

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

Diogo Moreira Pinto

Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Porto, Julho 2014

Resumo

A evolução da sociedade humana esteve sempre dependente da exploração de fontes de energia. Contudo, a sociedade atual tornou-se fortemente dependente das fontes energéticas não renováveis. Colocam-se presentemente problemas de sustentabilidade da sociedade, pois dado o carácter não renovável das principais fontes energéticas usadas teme-se a sua escassez. Esta problemática aparece acompanhada de outra que lhe é intrínseca, os impactos ambientais e ecológicos que o recurso a estas fontes energéticas origina. É neste contexto que surge a biomassa, como um recurso energético que poderá contribuir para a redução do consumo de fontes energéticas não renováveis e para a minimização dos impactos mencionados. O presente trabalho tem por objetivo o estudo e a modelação matemática simplificada da queima de peletes em regime permanente e em leito fixo. As peletes representam uma das formas de uso da biomassa para combustão e têm-se revelado bastante interessantes para pequenas soluções domésticas.

Numa primeira fase foi adaptado o modelo de Kanury (1975) sobre combustão de uma partícula sólida de carbono para a queima de partículas de peletes em leito fixo. Esta adaptação levou à consideração da influência da cinética e da transferência de massa sobre a reação de combustão.

Após a obtenção do modelo matemático implementou-se o mesmo no software Mathcad para recorrer à sua simulação. Foram estimados os valores dos parâmetros envolvidos no modelo, alguns dos quais baseados em informações determinadas a partir de um estudo experimental sobre a queima de peletes em leito fixo, que ainda decorre. Parte destes parâmetros, como por exemplo a temperatura da fornalha, o caudal de peletes, o caudal de ar ou a percentagem de matéria volátil libertada a partir das peletes, foram definidas como variáveis de entrada. Definindo uma gama de valores para estas variáveis obtiveram-se 32 simulações de queima em condições diferentes.

Da análise dos valores obtidos por estas simulações observaram-se e comentaram-se as principais tendências dos resultados do modelo para as correspondentes alterações das variáveis de entrada. Fizeram-se, ainda, pequenas alterações em algumas das variáveis de entrada para se verificar o comportamento do modelo para outras condições de operação diferentes.

Por fim, verificou-se que o modelo matemático formulado, apesar do reconhecimento de várias simplificações sobre alguns fenómenos físicos e químicos, consegue traduzir coerentemente a reação de combustão de biomassa.

Abstract

The evolution of the human society was always dependent on the exploration of energy sources. However, presently society became strongly dependent of non-renewable energy resources. Sustainability problems are now presented to mankind, because, given the non-renewable nature of the most important energy sources used, it is feared that they might end in due course. This problem seems to be followed of another one that is intrinsic to them, the environmental and ecological impacts that result of their unlimited consumption. Biomass is an energy resource that can contribute to the decreasing consumption of non-renewable energy sources and to minimize the mentioned impacts. The following work uses a simplified mathematical model to study the combustion of biomass pellets in a steady fixed bed combustor. Pellets represent one of the multiple ways of biomass combustion and became very interesting for small domestic solutions.

The present work begins with the adaptation of Kanury's model about the combustion of a solid carbon particle for the combustion of pellets in fixed bed. This adaptation considers the influence of kinetic and mass transfer in the combustion reaction.

After the development of such mathematical model, it was implemented on Mathcad software in order to proceed to simulation tests. The majority of the values for the model parameters were estimated having in account information given by an experimental study about combustion of pellets in fixed bed, which is still going on presently. Some of these parameters, for example the furnace temperature, the feeding pellets mass flow rate, the air flow or the percentage of released volatile matter from pellets, were defined as input variables. By establishing a range of values for these variables, there were obtained a total of 32 different simulations of combustion.

From the analysis of the data from the several simulations, the main results of the model for the corresponding changes of input variables were observed and commented. Afterwards small changes were made for some parameters in order to check the model behavior for different operation conditions.

Finally, it was found that the mathematical model obtained, despite few simplified physic and chemical phenomena, can coherently translate the overall behavior of the biomass pellet combustion.

Agradecimentos

Chegar a bom termo com este trabalho só foi possível graças ao contributo e à generosa colaboração de pessoas por quem tenho muito apreço. A todas expresso, portanto, a minha grande gratidão.

Não posso contudo deixar de particularizar um especial agradecimento ao Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho, pela sua incondicional disponibilidade, pelo empenho que manifestou nesta orientação, pelas indicações e críticas oportunas, pelos seus ensinamentos e correções imprescindíveis para a realização do trabalho.

Agradeço também à Engenheira Tânia Vanessa de Jesus Ferreira pelo apoio e pela informação prestada que contribuiu para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais pelo apoio, paciência e incentivo durante todo o meu percurso académico e a quem lhes devo tudo.

Agradeço à minha namorada pela compreensão e apoio em todos os momentos.

Por último, mas não menos importante a todos os grandes amigos de faculdade e de Seia que me acompanharam ao longo dos últimos anos e que os tornaram inesquecíveis.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Biomassa: bioenergia	4
1.2	Biomassa como combustível	5
1.3	Tecnologias para aproveitamento energético da biomassa.....	7
1.3.1	Combustão direta.....	8
1.3.2	Gaseificação de biomassa.....	10
1.3.3	Pirólise.....	11
1.3.4	Fermentação.....	13
1.3.5	Digestão anaeróbia	14
1.3.6	Biodiesel	15
1.4	Vantagens e desvantagens da biomassa.....	15
1.5	Queima de biomassa	17
2	Combustão de biomassa - Peletes	21
2.1	Densificação de biomassa	21
2.2	Peletes e briquetes.....	22
2.3	Fabrico de peletes	23
3	Modelo matemático de queima	25
3.1	Queima de uma partícula sólida contabilizando a influência da cinética e da transferência de massa.	25
3.2	Queima em regime permanente de partículas sólidas em leito fixo.	35
3.3	Inventário de partículas no leito e dimensões deste.....	42
3.4	Energia libertada na combustão.....	44
3.5	Determinação do parâmetro η	44
4	Resultados e discussão	47
4.1	Considerações de cálculo	47
4.2	Casos possíveis	49
4.3	Resultados da simulação	50
4.3.1	Tempo de queima	50
4.3.2	Altura do leito.....	55
4.3.3	Número de partículas.....	58
4.3.4	Potência térmica libertada	61
4.4	Discussão geral	62
5	Alterações ao caso de estudo.....	64
5.1.1	Fração queimada.....	64
5.1.2	Percentagem de voláteis	67

5.1.3	Redução de volume	70
6	Conclusões e sugestões	73
7	Referências Bibliográficas	75
	Anexo A.....	78
	Anexo B.....	83
	Anexo C.....	85
	Anexo D.....	94
	Anexo E.....	98

Índice de figuras

Figura 1- Distribuição das fontes energéticas no mundo.	1
Figura 2- Distribuição das fontes energéticas dos Estados Unidos.	2
Figura 3 - Consumo de energia primária em Portugal.	2
Figura 4 - Ciclo do carbono.....	5
Figura 5 – Tecnologias para aproveitamento energético da biomassa	8
Figura 6 - Sistemas de combustão da biomassa	9
Figura 7 - Produtos da pirólise	12
Figura 8 - Tipos de perfis da concentração de O ₂ em torno de uma partícula esférica	19
Figura 9 - Esquematização do fabrico de peletes	24
Figura 10 - Superfície da partícula durante a combustão.	26
Figura 11 -Esquema da queima em leito fixo de partículas sólidas.	36
Figura 12 -Fatia do leito fixo.	37
Figura 13 - Esquematização da fornalha	47
Figura 14 - Esquematização da fornalha	48
Figura 15 - Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 9,5$)	51
Figura 16 -Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 9,8$)	52
Figura 17 -Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 10$)	52
Figura 18 -Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 11$)	53
Figura 19 – Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 9,5$)	56
Figura 20 -Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 9,8$).....	56
Figura 21 -Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 10$).....	57
Figura 22 -Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 11$).....	57
Figura 23 - Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 9,5$)	59
Figura 24 - Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 9,8$)	60
Figura 25 - Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 10$)	60
Figura 26 – Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 11$).....	61
Figura 27 - Tempo de queima em função da fração queimada	65
Figura 28 - Altura o leito em função da fração queimada	65
Figura 29 - Número de partículas em função da fração queimada.....	66

Índice de tabelas

Tabela 1 - Quantidades percentuais de elementos em alguns combustíveis	6
Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas da biomassa e do carvão.....	7
Tabela 3 - Proporções relativas dos produtos de pirólise e respectivos processos.....	12
Tabela 4 - Propriedades de combustíveis de biomassa.....	18
Tabela 5- Características das peletes	23
Tabela 6 - Valores do η em função de θ e τ	46
Tabela 7- Valores base assumidos na simulação.....	48
Tabela 8 – Valores de temperatura e τ assumidos	49
Tabela 9 - Valores do caudal de peletes e correspondentes números de partículas por segundo	49
Tabela 10 - Tempos de queima para um caudal de peletes igual a 2 kg/h	50
Tabela 11 -Tempos de queima para um caudal de peletes igual a 3 kg/h	51
Tabela 12 – Tempos de queima equivalentes para 2 kg/h.....	54
Tabela 13 – Tempos de queima equivalentes para 3 kg/h.....	54
Tabela 14 - Altura do leito para um caudal de peletes igual a 2 kg/h	55
Tabela 15 - Altura do leito para um caudal de peletes igual a 3 kg/h	55
Tabela 16 - Número de partículas para um caudal de peletes igual a 2 kg/h	58
Tabela 17 - Número de partículas para um caudal de peletes igual a 3 kg/h	59
Tabela 18 - Potência térmica	61
Tabela 19 - Parâmetros do caso escolhido.....	64
Tabela 20 - Diâmetros obtidos para as várias frações queimadas	66
Tabela 21 - Potência térmica libertada para as frações queimadas	67
Tabela 22 - Valores de τ usados para dois casos de estudo.....	67
Tabela 23 -Resultados para o modelo exato considerando 70% e 60% de matéria volátil	68
Tabela 24 - Resultados para o modelo aproximado considerando 70% e 60% de matéria volátil.....	68
Tabela 25 - Potência térmica considerando 70% e 60% de matéria volátil	68
Tabela 26 - Resultados para o modelo exato considerando 77% e 60% de matéria volátil	69
Tabela 27 - Resultado para o modelo aproximado considerando 77% e 60% de matéria volátil	69
Tabela 28 - Potência térmica considerando 77% e 60% de matéria volátil	70
Tabela 29 - Resultados do modelo exato com e sem redução de volume	71
Tabela 30 - Resultado do modelo aproximado com e sem redução de volume	71

Nomenclatura

Símbolo	Descrição da variável	Unidades
$(AC)_{est}$	Razão ar combustível estequiométrica	-
A_f	Área de secção do queimador	m^2
d_p	Diâmetro da pelete	m
C_{O_2}	Concentração molar de oxigénio	$kmol\ m^{-3}$
$C_{O_2,s}$	Concentração molar de oxigénio à superfície	$kmol\ m^{-3}$
$C_{O_2,\infty}$	Concentração molar de oxigénio no infinito	$kmol\ m^{-3}$
C_∞	Concentração de oxigénio em escoamento uniforme	$m^3\ kg^{-1}$
C_{Oe}	Concentração molar do oxigénio à entrada do leito	$kmol\ m^{-3}$
C_{Os}	Concentração molar do oxigénio à saída do leito	$kmol\ m^{-3}$
d	Diâmetro	m
d_{esf}	Diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da pelete	m
d_{eq}	Diâmetro equivalente	m
D_g	Difusividade da fase gasosa	$m^2\ s^{-1}$
d_i	Diâmetro inicial das partículas à entrada da fornalha	m
d_{ix}	Diâmetro das partículas à entrada do elemento de volume dV	m
D_{O_2}	Difusividade do O_2	$m^2\ s^{-1}$
F_c	Fração do total de massa de carbono por massa de oxigénio	-
f_c	Fração de massa de carbono por massa de oxigénio	-
H	Altura do leito	m
k_c	Constante da taxa de reação	$m\ s^{-1}$
K_{glo}	Constante global da reação	$m\ s^{-1}$
l_p	Comprimento da pelete	m
m	Massa	kg
m_{ct}	Massa total de combustível sólido existente no leito	kg
M_C	Massa molar do carbono	$kg\ kmol^{-1}$
M_{O_2}	Massa molar do oxigénio	$kg\ kmol^{-1}$
\dot{m}_b	Caudal de biomassa	$kg\ s^{-1}$
\dot{m}_c	Caudal mássico de carbono à entrada da fornalha	$kg\ s^{-1}$
$\dot{m}_{C_3H_8}$	Caudal mássico do propano	$kg\ s^{-1}$
$\dot{m}_{CO_2,s}$	Caudal mássico de dióxido de carbono à superfície	$kg\ s^{-1}$
\dot{m}_{cx}	Caudal mássico de carbono à entrada do elemento de volume dV	$kg\ s^{-1}$
\dot{m}_g	Caudal mássico da fase gasosa	$kg\ s^{-1}$
$\dot{m}_{líquido}$	Caudal mássico líquido	$kg\ s^{-1}$
$\dot{m}_{O_2,s}$	Caudal mássico de oxigénio à superfície	$kg\ s^{-1}$
\dot{m}_v	Caudal mássico de voláteis	$kg\ s^{-1}$
\dot{m}''_c	Fluxo mássico de carbono	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
$\dot{m}''_{CO_2,s}$	Fluxo mássico de dióxido de carbono à superfície	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
$\dot{m}''_{c,s}$	Fluxo mássico de carbono à superfície	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$

\dot{m}''_g	Fluxo mássico da fase gasosa	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$\dot{m}''_{\text{liquido}}$	Fluxo mássico líquido	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$\dot{m}''_{O_{2,s}}$	Fluxo mássico de oxigénio à superfície	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
n	Número de mol	kmol
N_{pt}	Número total de partículas	-
\dot{n}_c	Taxa de consumo de carbono	kmol s^{-1}
\dot{N}_p	Número de partículas que atravessa uma secção por unidade de tempo	-
p	Pressão	Pa
$p_{O_{2,s}}$	Pressão parcial do oxigénio à superfície	Pa
PC_c	Poder calorífico do carbono	kJ kg^{-1}
$PCI_{C_3H_8}$	Poder calorífico inferior do propano	kJ kg^{-1}
\dot{Q}_b	Potência térmica libertada pelo caudal de biomassa	kW
\dot{Q}_c	Potência térmica libertada pelo carbono	kW
\dot{Q}_v	Potência térmica libertada pelos voláteis	kW
r	Raio da partícula	m
r_s	Raio da partícula à superfície	m
R	Constante universal dos gases perfeitos	$\text{J kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$
Re	Número de Reynolds	-
Sc	Número de Schmidt	-
Sh	Número de Sherwood	-
t	Tempo de queima	s
t_ϕ	Tempo de queima da partícula	s
T_f	Temperatura da fornalha	K
U_f	Velocidade do ar na secção A_f	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
V	Volume	m^3
V_i	Velocidade intersticial	m s^{-1}
v_r	Velocidade radial	m s^{-1}
Y_{O_2}	Fração mássica do oxigénio	-
$Y_{O_{2,s}}$	Fração mássica do oxigénio à superfície da partícula	-
$Y_{O_{2,\infty}}$	Fração mássica do oxigénio longe da partícula	-
α	Parâmetro da equação (87)	m
β	Parâmetro da equação (88)	m^3
ε	Porosidade	-
η	Fator corretivo	-
θ	Fração	-
μ_g	Viscosidade dinâmica do gás	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ρ_g	Massa volúmica da fase gasosa	kg m^{-3}
ρ_{O_2}	Massa volúmica do oxigénio	kg m^{-3}
$\rho_{O_{2,s}}$	Massa volúmica o oxigénio à superfície	kg m^{-3}
τ	Fator multiplicativo	-
ϕ	Esfericidade	-

φ	Fração queimada	-
-----------	-----------------	---

1 Introdução

Nos dias de hoje assiste-se a uma intensa corrida, por parte de muitos países e também de entidades particulares, atrás de todo o tipo de fontes energéticas na tentativa de resolver problemas com que a sociedade se depara, sejam eles de cariz ambiental ou financeiro. Esta procura constante tem levado a que as fontes energéticas tenham evoluído consoante a necessidade de consumo da sociedade e conforme o rendimento energético e económico da sua exploração.

No plano energético as questões relativas à sustentabilidade ambiental e social têm vindo, cada vez mais, a impor a sua relevância, particularmente as respeitantes aos recursos energéticos não renováveis. Tais questões têm conduzido à preocupação em atingir objetivos específicos no que respeita quer ao consumo dos recursos energéticos quer à sua gestão, de modo a conseguir usufruir dos mesmos durante mais tempo. Além disso, têm incentivado a procura de novas resoluções energéticas e novos caminhos cada vez mais direcionados para as designadas energias renováveis.

Durante um longo período de tempo o carvão mineral e a lenha foram as principais fontes energéticas (do século XVIII até ao século XIX). Porém, com a descoberta do petróleo e do seu reconhecido potencial todo o modelo de consumo de energia mundial se alterou. Desde então a sociedade passou a apoiar-se, essencialmente, no consumo deste recurso fóssil e dos seus derivados. Mas, devido ao ritmo atual de consumo estima-se que as suas reservas naturais possam vir a esgotar-se nos próximos anos. Para uma melhor perceção da importância das fontes energéticas, mostra-se nas Figuras de 1 a 3 a distribuição das várias fontes de energia utilizadas a nível mundial, nos Estados Unidos e em Portugal, respetivamente.

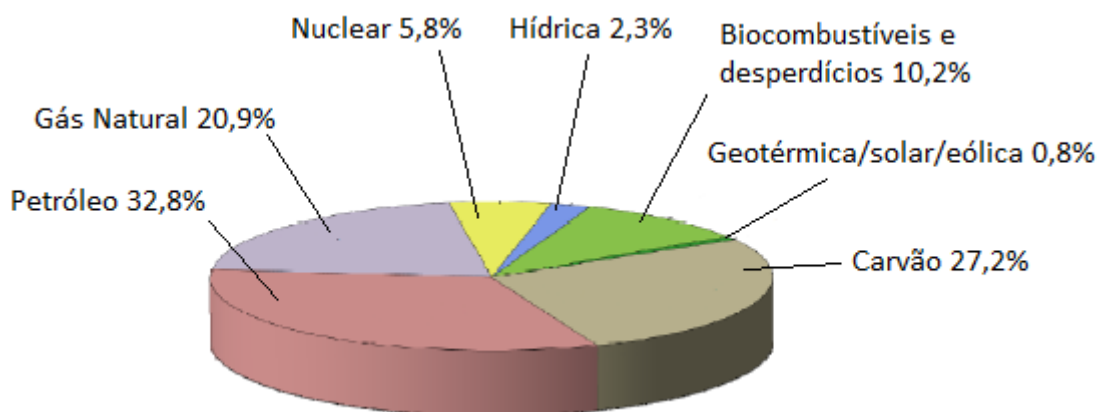


Figura 1- Distribuição das fontes energéticas no mundo.

Adaptado de IEA (2013)

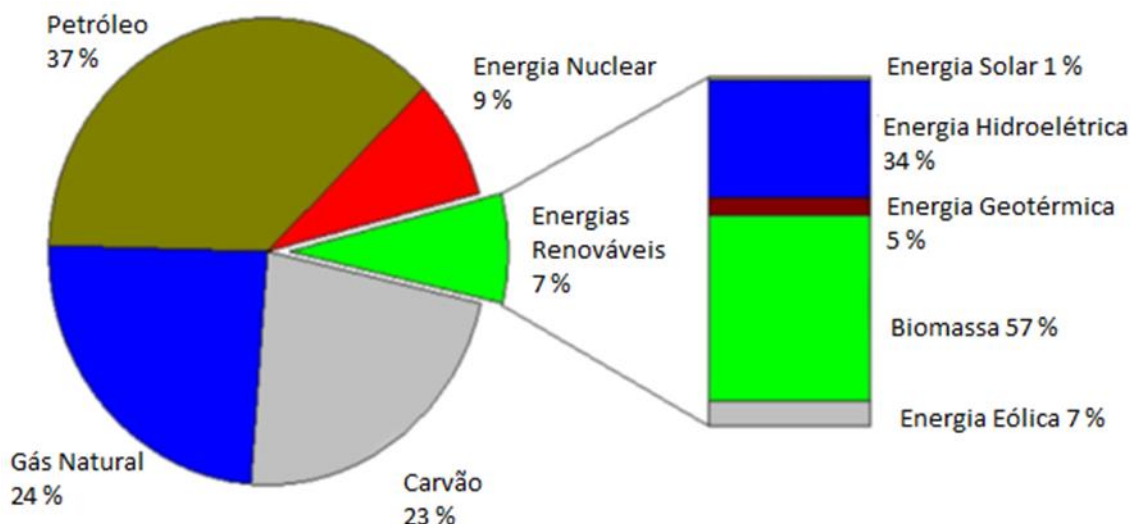


Figura 2- Distribuição das fontes energéticas dos Estados Unidos.

Adaptado de Saidur *et al.* (2011)

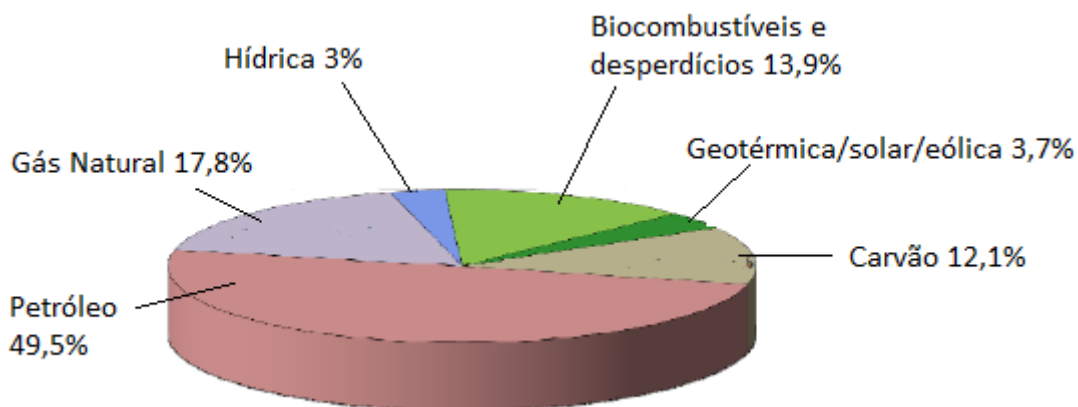


Figura 3 - Consumo de energia primária em Portugal.

Adaptado de IEA (2013)

Assim, a sociedade de hoje depara-se com um novo desafio: a moderação de utilização dos combustíveis fósseis e a consideração de outras opções possíveis de sustentação energética, capazes de substituir fontes de energia anteriormente utilizadas em determinadas áreas industriais, domésticas, agrícolas, etc. (Saidur *et al.* 2011; Trainer, 2014).

Porém, para algumas zonas do mundo e para algumas aplicações específicas, a substituição dos recursos energéticos não será facilmente exequível, visto que, até à data, poderá não existir outra solução que seja energeticamente e economicamente mais viável. Tal

leva à conclusão de que o problema das fontes energéticas a nível mundial será sempre alvo de um estudo e preocupação constante, sempre à procura de uma solução que consiga manter o melhor balanço entre a economia mundial, o rendimento energético e a sustentabilidade ambiental (Wiesenthal e Mourelatou, 2006; Hall *et al.*, 2014).

As energias renováveis têm assim rompido em força nos últimos anos, com bastante prioridade face às fontes não renováveis já conhecidas. A preocupação é compensar as desvantagens das energias não renováveis, tentar manter ao máximo o equilíbrio entre economia, rendimento energético e sustentabilidade ambiental, acompanhar e responder a todo o desenvolvimento que a sociedade impõe. Por isso, na investigação relativa às energias renováveis aplicam-se largos investimentos de modo a conseguir maximizar a sua energia útil. É esperado que no futuro 30% dos combustíveis usados e 60% do fornecimento de energia elétrica tenha origem em fontes de energia renovável (Saidur *et al.* 2011).

É neste contexto que surge a combustão da biomassa como um novo (tecnologicamente novo), mas ao mesmo tempo antigo (historicamente), processo de obtenção de energia. Nos nossos dias a combustão de biomassa é responsável por fornecer 4% da energia total primária consumida na União Europeia, correspondendo a dois terços do total das energias renováveis consumidas (Wiesenthal e Mourelatou, 2006). Em países em desenvolvimento o uso de biomassa pode chegar a 35% da energia produzida e revela-se bastante interessante a nível doméstico, conseguindo satisfazer cerca de 14% das necessidades energéticas mundiais (Demirbas, 2003; Demirbas, 2007).

Dada a sua relevância no plano energético e devido à fácil acessibilidade a este recurso, a combustão de biomassa tem sido alvo de um acompanhamento científico constante para que se possa rentabilizar ao máximo o seu uso, visto que a nível de eficiência energética o processo ainda necessita de ser otimizado, pois acarreta custos adicionais à exploração deste recurso. Contudo, tal exploração é acompanhada de diversos problemas (ambientais, energéticos, etc.) exigindo uma profunda reflexão sobre até onde o seu desenvolvimento poderá chegar sem comprometer o ambiente e as diversas atividades humanas diretamente relacionadas com o meio de onde se explora a biomassa.

É neste contexto que surge o presente trabalho, o qual tem por objetivo o estudo e a modelização matemática simplificada de queima de biomassa (peletes) numa pequena fornalha em regime permanente. Este tipo de queima revela-se bastante atraente para pequenas aplicações energéticas, como por exemplo, aquecimento de espaços interiores ou aquecimento de água. Assim, o modelo proposto para estudo terá por objetivo aproximar-se à realidade da combustão, para uma melhor perceção deste fenómeno e que possa ajudar à monitorização e dimensionamento da fornalha.

1.1 Biomassa: bioenergia

Entende-se por biomassa todo o combustível proveniente de madeira, ramos, folhas, ervas, sobras da atividade agrícola, resíduos florestais e domésticos, estrume, em suma: matéria orgânica que pode ser queimada ou convertida em gás de baixa qualidade, em reatores próprios, de modo a obter energia, designando-se consequentemente este produto por bioenergia.

Citando Vargas-Moreno *et al.* (2012) “biomassa é compreendida como a fração biodegradável de produtos biológicos e resíduos de atividades agrícolas (incluindo os que tem origem vegetal e animal), atividades de silvicultura (incluindo também a pesca e aquacultura) e a fração biodegradável de resíduos industriais e municipais”.

A biomassa é a mais antiga e mais bem estabelecida forma de adquirir energia, com custos de aquisição e armazenamento bastante baixos, comparativamente a fontes energéticas derivadas do petróleo. Semelhante a todos os processos de obtenção de energia, a utilização da biomassa assenta na conversão e transformação da matéria-prima. Consoante o tipo de biomassa, isto é, conforme a matéria primária utilizada no processo, assim como o tipo de tecnologia usado para a sua conversão, a biomassa poderá comportar-se como combustível para sistemas de aquecimento de edifícios, para transporte ou para produção de eletricidade.

Deste modo a biomassa pode ser classificada de várias maneiras, como por exemplo, com base nas suas propriedades, dividindo-se neste caso em biomassa lenhosa e não lenhosa (por exemplo: plantas aquáticas, estrumes animais e humanos, alguns tipos de vegetação como as plantas herbáceas). A primeira designa maioritariamente a matéria obtida através da conversão de produtos de origem florestal enquanto a segunda engloba essencialmente resíduos. Se for classificada relativamente ao tipo de matéria que lhe dá origem, pode-se diferenciar a biomassa proveniente de resíduos primários (subprodutos de culturas alimentares e florestais), resíduos secundários (restos de processamento de biomassa para produção de alimentos ou outros produtos), resíduos terciários (biomassa que era usada mas que atingiu o fim de vida) e resíduos de culturas energéticas (Vargas-Moreno *et al.*, 2012).

A biomassa apresenta um potencial energético resultante da capacidade de armazenamento energético sob a forma de compostos orgânicos. O processo mais comum, na maioria das fontes de biomassa, é a fotossíntese. Esta é um processo metabólico que envolve reações químicas que as plantas utilizam para produzirem compostos orgânicos (hidratos de carbono). Este processo necessita de luz solar, de água absorvida a partir dos solos e de dióxido de carbono absorvido do ar envolvente para produzir compostos orgânicos. É um processo natural de conversão de energia solar em energia química (armazenada nas ligações químicas dos compostos orgânicos). A equação química seguinte traduz genericamente este processo (Patzek, 1997):



Os compostos produzidos, através da reação fotossintética, contêm o potencial energético da biomassa, e que no processo de conversão, terão que ser transformados em

outros compostos por meio de reações que envolvem libertação de energia. É esta energia que se pretende usar para os mais diversos fins.

1.2 Biomassa como combustível

A biomassa é o único “petróleo orgânico” que se comporta como um combustível com identidade renovável. Quando esta é queimada, ou tratada através de outro processo, o carbono existente na biomassa é libertado e reage com o oxigénio presente no ar envolvente, formando moléculas de dióxido de carbono que são lançadas para a atmosfera.

É de salientar que as propriedades do combustível afetam a técnica de processamento e por isso deve-se ter em conta a origem da biomassa e o seu tratamento ou estado. (Saidur *et al.*, 2011).

Se for levado em consideração que existe uma queima completa da biomassa, isto significa que todo o dióxido de carbono libertado pela reação de combustão será equivalente a todo o dióxido de carbono que foi absorvido durante toda a fase de crescimento da matéria-prima, podendo o mesmo decorrer numa escala longa, de vários anos. Por tal razão a queima deste tipo de combustível não incrementa a quantidade de dióxido de carbono já existente. Este dióxido de carbono reciado poderá ser absorvido novamente, dando assim origem ao chamado de ciclo de carbono (Figura 4). Se ao invés, a biomassa não for utilizada para queima, ou para outro processo de transformação, esta ao longo do tempo irá eventualmente libertar o carbono nela contida, mas de uma forma muito mais demorada, e sem qualquer tipo de aproveitamento do seu potencial, sendo por isso um desperdício energético. A queima de biomassa permite assim recuperar a energia nela contida, acelerando o processo de libertação do carbono.

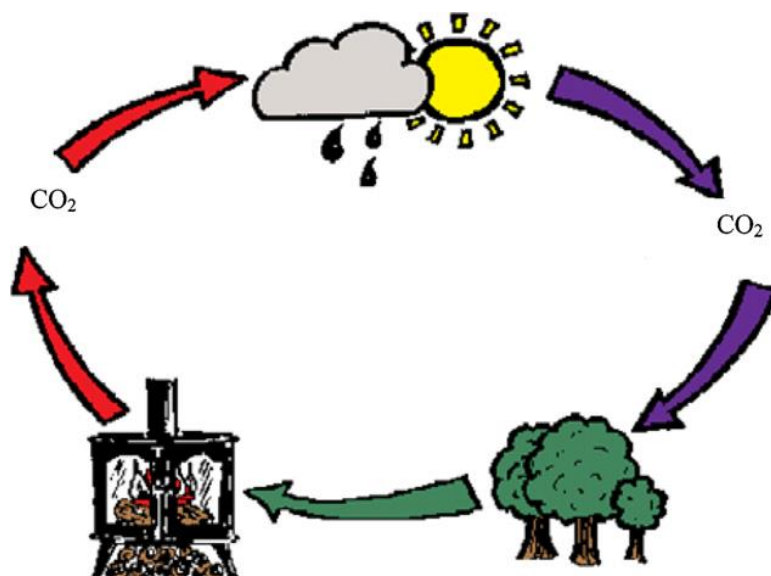


Figura 4 - Ciclo do carbono

Saidur *et al.* (2010)

Contudo, a biomassa não é um combustível ideal. Apresenta menos quantidade de carbono e hidrogénio e maiores concentrações de oxigénio na sua constituição comparativamente aos combustíveis mais tradicionais, como por exemplo o carvão, e uma maior percentagem de humidade e de cinzas, o que a torna um combustível de fraco poder calorífico e com problemas de estabilidade de chama. Para uma melhor perceção na Tabela 1 são apresentadas as quantidades percentuais dos principais elementos de alguns combustíveis.

Tabela 1 - Quantidades percentuais de elementos em alguns combustíveis
(Balat e Ayar, 2005)

Combustível	Carbono (%)	Hidrogénio (%)	Oxigénio (%)
Carvão	85	6	9
Petróleo	85	15	0
Metano	75	25	0
Madeira	49	6	45

Além da sua constituição, a sua densidade energética é inferior à dos combustíveis fósseis (10-40%). Isto compromete bastante o tipo de fim que se pretende no uso de biomassa. Torna-se assim importante determinar o tipo de biomassa e o seu potencial energético, para que se investigue as alternativas mais adequadas para extração de energia, controlo, tratamento e para a atribuição de um preço correspondente que o consumidor terá que pagar para o seu uso (Schuck, 2006; Saidur *et al.*, 2011). Contudo, nem tudo é mau porque existindo maiores concentrações de oxigénio, não ligado quimicamente, na sua constituição, significa que por unidade de massa de combustível será necessária uma menor massa de ar para a combustão. Posto isto, se for menor a massa de ar então haverá menor quantidade de azoto a ser manuseada no processo de combustão, ou seja, menor será a quantidade de calor libertada neste processo que seria destinada para o aquecimento desta quantidade de azoto.

Por isso, apesar da biomassa apresentar um menor poder calorífico, tal facto, na prática, é compensado pela menor necessidade de ar de combustão, atingindo-se assim elevadas temperaturas de chama, sendo estas por vezes superiores às obtidas com combustíveis fósseis que requerem uma maior massa de ar por quantidade de combustível.

Na Tabela 2, é apresentada uma comparação com dados aproximados de várias propriedades do carvão e da biomassa, para uma melhor perceção entre as suas diferenças como combustível.

Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas da biomassa e do carvão
(Demirbas, 2007)

Propriedade	Biomassa	Carvão
Massa volúmica (kg/m ³)	~500	1300
Carbono (% em massa)	42-54	65-85
Oxigénio (% em massa)	35-45	2-15
Enxofre (% em massa)	Max 0,5	0,5-7,5
SiO ₂ (% em massa)	23-49	40-60
K ₂ O (% em massa)	4-48	2-6
Al ₂ O ₃ (% em massa)	2,4-9,5	15-25
Fe ₂ O ₃ (% em massa)	1,5-8,5	8-18
Temperatura de ignição (K)	418-426	490-595
Poder calorífico (MJ/kg)	14-21	23-28

1.3 Tecnologias para aproveitamento energético da biomassa

Ao longo do tempo desenvolveram-se alguns métodos de conversão energética da biomassa para usufruir do seu potencial. Os diferentes métodos existentes diferem, dependendo do rendimento energético que se pretende para cada aplicação, da disponibilidade de matéria-prima (quantidade), do tipo de recurso usado (para as várias formas em que a biomassa se pode apresentar há modos próprios de conversão energética), de condições económicas e de imposições ambientais. A energia química contida na biomassa pode-se tornar disponível de várias maneiras. A melhor das escolhas tecnológicas depende das características físicas e químicas da biomassa, da sua disponibilidade, da sua necessidade e da rentabilidade económica de cada processo (Saidur *et al.*, 2011).

De seguida, são apresentados os principais sistemas ou tecnologias de exploração energética da biomassa, os quais se encontram esquematizados na Figura 5.

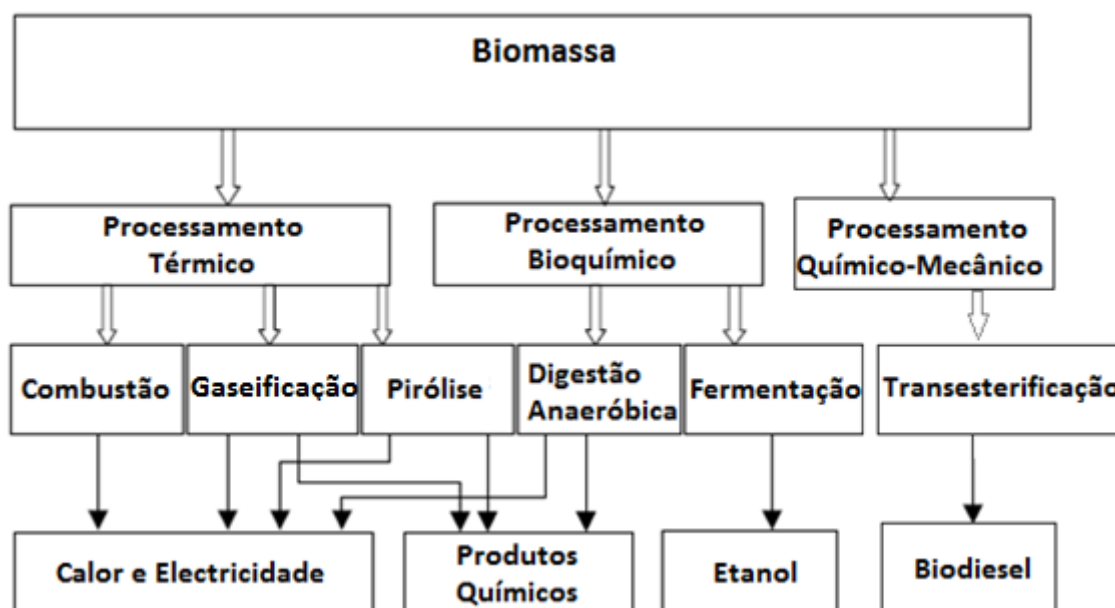


Figura 5 – Tecnologias para aproveitamento energético da biomassa

Adaptado de Schuck (2006)

1.3.1 Combustão direta

A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis provenientes da biomassa permite a sua utilização para produção combinada de calor e de energia elétrica através do uso do clássico ciclo a vapor (ciclo de Rankine) em que, por exemplo, o acionamento de uma turbina ligada a um gerador permite a produção de energia elétrica (Nussbaumer, 2003). Para que se obtenham resultados eficientes a biomassa é previamente tratada, transformando-a num combustível seco, compactado e com boas propriedades para combustão. A combustão de biomassa é a forma mais comum de converter este combustível em energia e o processo mais desenvolvido e responsável por 97% da bioenergia produzida mundialmente (Demirbas, 2007).

Dentro deste método, a forma mais simples de queima é através de sistemas de fornecimento de caudal constante de biomassa para o interior de uma câmara de combustão (leito fixo). Nestes sistemas a biomassa encontra-se dentro de uma fornalha onde o ar passa entre o leito fixo ocorrendo secagem, gaseificação e combustão em grelha, sendo as cinzas constantemente retiradas. Em algumas aplicações é usada uma segunda entrada de ar para a queima separada dos gases provenientes da gaseificação. A fornalha é construída de modo a que exista uma distribuição uniforme de combustível no seu interior e um fornecimento de ar homogêneo para a queima. Porém, esta solução apenas é aplicável a um tipo de combustível restrito, nomeadamente combustíveis sólidos (Demirbas, 2007).

Outro sistema de combustão direta é o de leito fluidizado. Neste sistema o combustível queima numa quente suspensão de materiais granulares (sílica e dolomita) e gás, em constante mistura, onde entra um caudal de ar através da câmara de combustão. Através deste processo consegue-se um uso de um leque mais abrangente de biomassa devido às misturas produzidas. A intensa transferência de calor e a mistura de combustível permitem uma boa combustão que requer um baixo excesso de ar e aumenta a eficiência do processo. Se forem usadas superfícies internas de trocas de calor, recirculação de água ou de gás, consegue-se uma temperatura de combustão baixa, evitando problemas com a sinterização de cinzas. Este método é usado para aplicações de grande escala (30 MWth). Contudo, envolve custos de investimento mais elevados que o sistema de leito fixo visto que as partículas a queimar deverão ser o mais uniforme possível e de tamanho mais reduzido. Além disso, o facto de se operar com pós/gás leva a que sistemas de limpeza sejam necessários e o consumo de energia para movimentar ar de fluidização seja elevado (Brown *et al.*, 2006).

Outra via de queima passa por reduzir o tamanho das partículas de combustível ao ponto de a biomassa se apresentar em pó, com diâmetros na ordem das centenas ou dezenas de micrómetros. Esta biomassa reduzida a pó é misturada com ar e injetada no interior de uma câmara de combustão, ocorrendo a queima com o combustível em suspensão. A mistura ar/combustível é geralmente injetada tangencialmente para dentro de uma fornalha cilíndrica estabelecendo-se um escoamento rotacional (vortex). Devido às elevadas temperaturas obtidas por este processo, é usual as paredes das fornalhas serem arrefecidas a água. Visto que o tamanho das partículas é muito reduzido a gaseificação e a combustão ocorrem praticamente ao mesmo tempo, o que torna este processo altamente eficiente, com a vantagem de permitir uma fácil regularização do caudal de combustível e de necessitar de um excesso de ar muito reduzido (IEA Bioenergy).

Estes métodos, acima descritos de um modo muito sucinto, podem ser observados na Figura 6.

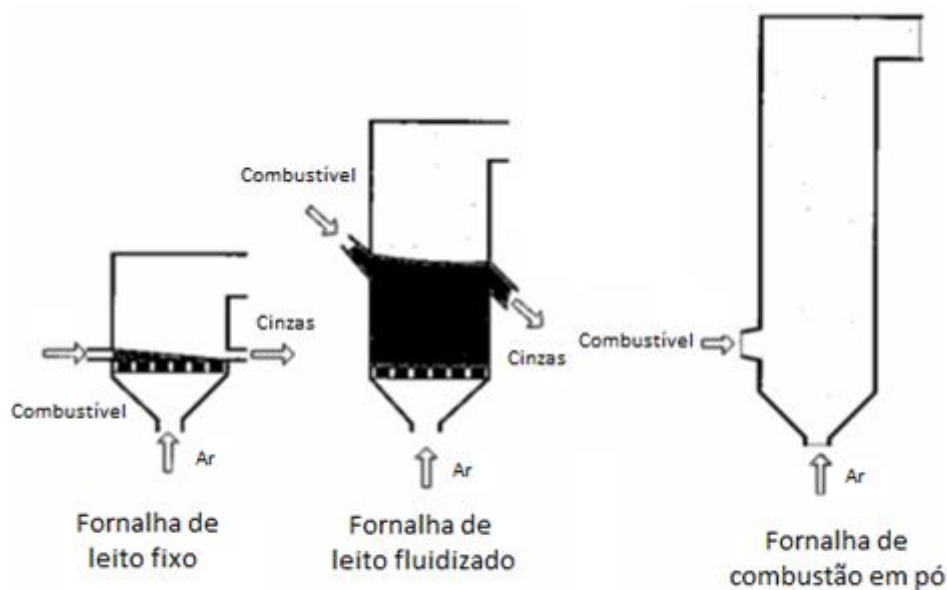


Figura 6 - Sistemas de combustão da biomassa

Adaptado de Brown *et al.* (2006)

Uma outra técnica relacionada com a combustão de biomassa é a co-combustão ou combustão combinada. Esta técnica consiste na queima combinada de biomassa e combustíveis fósseis, como o carvão, para produção de energia elétrica. A grande vantagem deste processo é permitir a substituição parcial de combustíveis fósseis nesta operação, reduzindo custos relativos ao combustível e reduzindo também as emissões de dióxido de carbono, azoto e enxofre. Em consequência, haverá uma minimização de resíduos, uma redução da poluição de solos e de águas. Contudo, a combustão desta mistura leva à formação de depósitos na caldeira que implicam limitações ao seu uso. Tal deve-se à presença de substâncias alcalinas nas cinzas que podem reagir com materiais constituintes da estrutura. É por este motivo estabelecido que a biomassa deverá participar até, aproximadamente, em 20% da constituição deste combustível, ou seja, da mistura (Brown *et al.*, 2006).

Existem três técnicas de co-combustão:

- Co-combustão direta: queimar diretamente a mistura de carvão e biomassa na caldeira;
- Co-combustão paralela: paralelamente, a caldeira é alimentada com carvão e biomassa, previamente separados;
- Co-combustão indireta: a biomassa é gaseificada, podendo então, posteriormente, ser queimada na caldeira ou num ciclo combinado de combustão/turbina para produção de energia.

Este processo, contudo, depara-se com algumas limitações como: custos associados ao pré-tratamento da biomassa e custos relativos ao tratamento das cinzas resultantes da queima (Nussbaumer, 2003).

1.3.2 Gaseificação de biomassa

Gaseificação é a conversão com oxidação parcial a elevadas temperaturas (1300 °C) de matéria carbonosa em gás, numa atmosfera envolvente de ar, oxigénio ou vapor (agente gaseificador) (Al-Kassir *et al.*, 2012). Desta conversão obtém-se uma mistura gasosa de hidrogénio, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de água e pequenas quantidades de hidrocarbonetos pesados. O gás obtido através desta conversão apresenta um pequeno poder calorífico (no caso de o meio oxidante ser o ar é de 4-6 MJ/m³ (a 0 °C e 1 atm) (Schuck, 2006)), bastante inferior ao do gás natural (39 MJ/m³). O poder calorífico do gás depende do processo de gaseificação e da composição da biomassa a ser usada.

Significa, portanto, que tanto a matéria orgânica usada para gaseificação como o tipo de tecnologia de gaseificação deverão ser adequados à aplicação final do combustível gasoso. Este gás pode ser queimado diretamente ou então usado como combustível no acionamento de motores de combustão interna ou de turbinas a gás. Contudo, o seu fraco poder calorífico

requer o consumo de grandes quantidades de gás. Pode ainda ser utilizado para produzir combustíveis como o metanol ou o hidrogénio. Neste processo também são produzidos resíduos inorgânicos e alguns óleos.

A gaseificação permite a produção de eletricidade através de turbinas a gás com rendimentos relativamente altos (comparado com o ciclo Rankine) e custos reduzidos dentro da escala dos sistemas de biomassa.

Se o meio oxidante for o ar enriquecido com oxigénio, os resultados serão mais satisfatórios, conseguindo-se atingir um poder calorífico na ordem de 10-15 MJ/m³ (m³ a 0 °C e 1 atm), pois o efeito do azoto existente na atmosfera é menor.

Este processo é já conhecido pela sociedade há bastante tempo, através da gaseificação de carvão. Porém, tenta-se agora alargar o leque de materiais a ser gaseificados, existindo por isso grande atenção no que toca à biomassa e a desperdícios de várias atividades. O combustível produzido pode também ser usado em cogerações e em ciclos combinados de modo a melhorar a eficiência de conversão de energia (Schuck, 2006).

1.3.3 Pirólise

A pirólise da biomassa é um processo lento de decomposição térmica da matéria orgânica na ausência de oxigénio. Esta é uma reação química relativamente lenta que ocorre a temperaturas entre os 400-800 °C e converte a biomassa em biocombustíveis. Atingindo temperaturas de cerca de 500 °C é possível produzir o bio-óleo, com um poder calorífico de 17 MJ/kg, transformando cerca de 80% da matéria primária (Saidur *et al.*, 2011). Comparativamente ao carvão, a pirólise da biomassa inicia-se mais cedo e a quantidade de matéria volátil é maior (cerca de 70% contra 36% do carvão) (Vamvuka, 2011).

Os produtos da pirólise são, essencialmente, uma mistura de gás rica em hidrocarbonetos, resíduos de carbono sólidos, cinzas e líquidos (bio óleos), os quais dependem da temperatura, da pressão, da velocidade de aquecimento, do tamanho das partículas, dos catalisadores utilizados no processo e da composição da biomassa. Na Figura 7 estão exemplificados vários produtos desta tecnologia. A título de exemplo, a biomassa proveniente da madeira tem como produtos da pirólise CO, CO₂, CH₄, H₂ e alguns produtos orgânicos. A principal reação neste processo que envolve madeira é a conversão de biomassa em carvão e matéria volátil (Saidur *et al.*, 2011; Vamvuka, 2011).

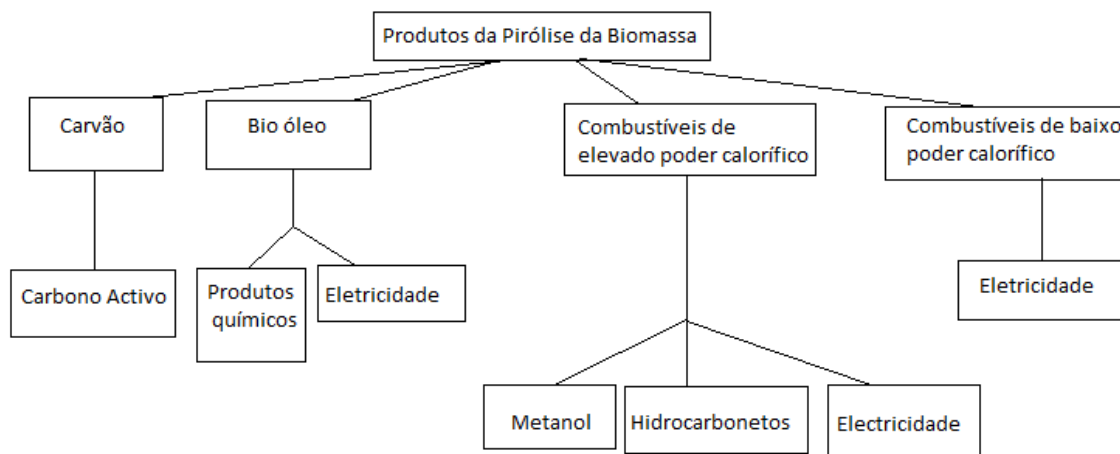


Figura 7 - Produtos da pirólise

Adaptado de Saidur *et al.* (2011)

As proporções relativas dos produtos resultantes da pirólise são descritos na Tabela 3 consoante o tipo de tratamento (Brown *et al.*, 2006).

Tabela 3 - Proporções relativas dos produtos de pirólise e respetivos processos
(Brown *et al.*, 2006).

Processo/Modo	Condições	Líquido	Carvão	Gás
Pirólise Rápida	Temperatura moderada, pequeno período de tratamento (ou processamento)	75%	12%	13%
Carbonização	Baixa temperatura (300-500 °C) período de tratamento muito longo (horas ou dias)	30%	35%	35%
Gaseificação	Alta temperatura período de tratamento longo	5%	10%	85%

O bio-óleo tem sido recentemente alvo de interesse, pois pode ser usado como combustível em caldeiras, motores diesel e em turbinas a gás para produção de eletricidade com a vantagem de, relativamente à biomassa sólida, apresentar custos mais reduzidos inerentes ao transporte, armazenamento e processamento deste combustível. Outro aspeto importante prende-se com o facto de o bio-óleo separar a produção de combustível e a produção de energia elétrica, permitindo a operação independente de ambos os processos (Brown *et al.*, 2006).

1.3.4 Fermentação

Os biocombustíveis são nos dias de hoje, uma importante alternativa aos combustíveis fósseis e contribuem significativamente para a redução das emissões. Um dos processos que permite a sua obtenção é a fermentação. Esta consiste num processo biológico anaeróbio de conversão de açúcares existentes nas plantas em álcool. Atualmente estão a ser desenvolvidas várias formas de aplicar a fermentação com o fim de obter o máximo rendimento possível.

Um dos processos mais convencionais consiste em usar biocatalisadores que, nas condições ambientais mais propícias, convertem os hidratos de carbono da biomassa (hemicelulose e celulose) em açúcares. Estes açúcares serão por sua vez fermentados, dando origem aos biocombustíveis e a outros produtos químicos valiosos (Demirbas, 2003; Balat e Ayar, 2005).

Numa fase inicial a biomassa é selecionada, consoante a sua qualidade, composição e tamanho para que os processos se tornem mais rentáveis. A biomassa é então aquecida de modo a que as paredes fibrosas das células se destruam tornando a celulose mais facilmente hidrolisável. Através de enzimas ou de outros catalisadores, os açúcares contidos na celulose são separados por hidrólise, levando este processo alguns dias. Após este estágio, são adicionados microrganismos (por exemplo leveduras) as quais produzirão a partir de moléculas de açúcar, substâncias que serão usadas como biocombustíveis. Procede-se então a uma separação dos produtos obtidos (água, solventes e resíduos sólidos). Após a obtenção do combustível, alguns destes produtos residuais são reenviados para refinarias onde podem ser reprocessados para outros fins.

A constituição dos combustíveis obtidos pela fermentação são essencialmente álcoois e seus derivados. Muitos destes produtos são bastante cobiçados no mercado mundial, pois podem ser um substituto aos combustíveis fósseis e levam a menores emissões de carbono. Um destes produtos é o butanol, um combustível que queima a temperatura e pressões constantes levando a uma queima completa, pelo que se torna vantajoso comparativamente ao consumo da gasolina (Ranjan e Moholkar, 2012). Outro caso é o etanol, muito utilizado na indústria agrícola e química e em alguns países, nomeadamente no Brasil, é usado como combustível em automóveis (puro ou misturado com gasolina), embora segundo Patzek *et al.* (2005) seja um combustível de pouca eficiência na sua produção face à inexistência de processos que tornem a sua utilização sustentável. Segundo o mesmo, relativamente à sua produção e respetiva queima as emissões de dióxido de carbono e de óxido de azoto são superiores às obtidas a partir do uso apenas de combustíveis fósseis. A eficiência energética de todo o processo de produção de etanol não compensa a quantidade de energia que é gasta para a sua obtenção, assim como, a matéria-prima disponível para o produzir não satisfaz as necessidades.

1.3.5 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo de conversão bioquímico no qual a decomposição da biomassa (sólida e líquida) se faz através de bactérias na ausência de oxigênio, sendo o produto final biogás constituído essencialmente por metano (55 a 75%), dióxido de carbono (de 25 a 45%) e outros gases residuais dependendo do processo em causa. Este produto, o biogás, tem um poder calorífico de 18-29 MJ/m³ (m³ a 0 °C e 1 atm). A digestão anaeróbia é um processo bastante versátil e eficaz visto que pode ser realizado a partir de vários tipos de resíduos de biomassa sejam eles municipais, industriais, resíduos provenientes da indústria alimentar e de outras atividades humanas.

No processo de digestão anaeróbia identificam-se três fases distintas:

- Fermentação: ocorrência de processos de hidrólise da matéria orgânica que é convertida em moléculas mais pequenas, que por sua vez são transformadas em ácidos através de acidogénese;
- Acetano génese: os ácidos obtidos transformam-se em ácido acético, hidrogénio e dióxido de carbono;
- Metano génese: através de bactérias anaeróbicas.

O biogás pode ser usado para produção de biocombustíveis, mas o seu interesse reside essencialmente na produção de eletricidade, sendo geralmente queimado em motores de combustão interna que poderão estar associados a ciclos combinados de recuperação de calor. Em aplicações de grande escala, o biogás pode ser também queimado em ciclos de turbinas a gás (Coelho *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2006).

As frações líquida e sólida resultantes da digestão anaeróbia podem ser usadas como fertilizantes.

1.3.6 Biodiesel

O biodiesel é um combustível renovável, não tóxico e biodegradável que pode ser usado como substituto ou em conjunto com o combustível diesel proveniente do petróleo. As suas características químicas e físicas não permitem que este seja usado diretamente como combustível sem que seja transformado. Este é constituído por óleos de origem vegetal e animal, de alto poder calorífico, e é obtido através de uma reação exotérmica da transesterificação de triglicerídeos e álcool na presença de um catalisador, após prensagem da biomassa (Yokoyama e Matsumura, 2008). Existem ainda outros métodos de produção de biodiesel como a pirólise, esterificação e craqueamento, contudo estes são menos utilizados. Uma grande vantagem é que os motores a diesel fabricados nos últimos 15 anos conseguem funcionar com biodiesel, em várias percentagens de mistura ou mesmo exclusivamente com biodiesel, sem existirem quaisquer alterações aos motores. Outros aspetos importantes a ter em conta é que o biodiesel não contém hidrocarbonetos policíclicos, emite pouco monóxido de carbono e pouco dióxido de enxofre quando comparado com o diesel tradicional, tornando este combustível uma opção mais “limpa”, pois reduz as emissões e riscos de saúde (Vasudevan e Fu, 2010).

1.4 Vantagens e desvantagens da biomassa

Todas as ações que são levadas a cabo na exploração energética, de forma mais ou menos significativa, têm sempre repercussões no meio ambiente que se poderão manifestar de modo mais acelerado ou mais tardio. Torna-se fulcral, por esse motivo, que para qualquer investimento sejam analisadas as consequências advindas das implementações de medidas que incentivem o desenvolvimento e a exploração de alguns recursos naturais e as vantagens que a sua exploração poderá oferecer.

A biomassa reveste-se de grande interesse e com várias vantagens em termos de exploração. Como recurso energético torna-se bastante interessante e atrativo por ser renovável e por reduzir a emissão de gases com efeito de estufa. Além disso o uso da biomassa, em muitas circunstâncias, acarreta custos relativamente baixos, promove economicamente as regiões onde é implementada, através de criação de novos postos de trabalho em zonas rurais (que atualmente por toda a Europa se encontram em decréscimo económico e abandono demográfico) e paralelamente ajuda o desenvolvimento do sector agrícola (Schuck, 2006).

Outro interesse da biomassa é permitir a criação de bons planos de organização florestal e promover a criação de hábitos de preocupação ambiental, valorizando a prevenção contra incêndios (Núñez-Regueira *et al.*, 2001). O reaproveitamento de resíduos orgânicos agrícolas, industriais e domésticos também é uma valiosa vantagem que advém deste processo, reciclando matéria que, à partida, poderia estar “perdida”.

Entre as energias renováveis, a biomassa revela-se a única fonte energética da qual se pode obter um combustível líquido, o que a coloca numa posição de destaque. A maioria dos

processos conhecidos de energias renováveis destinam-se à produção de eletricidade e esta corresponde apenas a 20% da energia consumida em países desenvolvidos. A biomassa aparece com possibilidades de uso que vão para além da produção de energia elétrica.

Para além da vertente ambiental, se houver uma maior aposta neste combustível, alguns países tornar-se-ão mais independentes do monopólio do petróleo. Tal independência terá impacto a nível do mercado internacional de petróleo podendo diminuir os preços em vigor, contribuindo para o equilíbrio da situação financeira de muitas regiões do mundo (Ferreira, 2013; Ferreira *et al.*, 2014).

Porém, a exploração de biomassa apresenta limitações que devem ser seriamente consideradas. Uma forte procura de produção de biomassa poderá levar a um uso intensivo de áreas agrícolas e florestais que, por consequência, irá alterar a biodiversidade existente, as paisagens e a qualidade dos solos, da água e do ar, pondo em causa o ecossistema. Deste modo, deve ter-se em atenção o tamanho das áreas destinadas à cultura de matéria-prima para produção de biomassa por implementação de regras ambientais, as quais deverão ser detalhadamente analisadas para cada país e para cada região (Wiesenthal e Mourelatou, 2006; Trainer, 2014). A falta de tais regras ambientais podem gerar uma grande competição territorial entre a atividade agrícola e a produção de energia, caso exista uma aposta intensiva na biomassa. Ambas as atividades necessitam de terrenos e água, duas variáveis que facilmente entram em conflito quando colocadas no panorama evolutivo, isto é, com o crescimento da população humana, a disponibilidade de água e terrenos terá que ser devidamente dividida de modo a responder adequadamente ao consumo humano (Schuck, 2006; Wiesenthal e Mourelatou, 2006).

Este cenário conflituoso, caso não sejam tomadas medidas de prevenção, poderá levar à ocupação de terrenos por grandes áreas florestais, colocando em causa a vida de diferentes seres vivos e a própria qualidade dos recursos utilizados, alterando significativamente o meio ambiente e, em certas regiões, pode conduzir a grandes alterações irreversíveis. Por exemplo, o relatório da Agência Europeia do Ambiente (Wiesenthal e Mourelatou, 2006), ao referir-se ao grande potencial para a produção de bioenergia a partir de biomassa na Europa, apresenta uma série de recomendações para tornar a produção compatível com o meio ambiente. Nesse sentido aponta que se deve dedicar pelo menos 30% da área de terra agrícola para uma agricultura “ambientalmente orientada”, com exceção das áreas/países densamente povoadas, em que o valor deve ser de 20%, e pelo menos 3% das terras atualmente cultivadas intensivamente devem ser reservadas, em 2030, como área de compensação ecológica. Considera ainda que se, no futuro, certas áreas, como pastagens permanentes, olivais tradicionais, etc., forem libertas da agricultura não devem ser convertidas em meios de culturas energéticas aráveis mas, antes, deixadas para a produção de capim e de árvores a utilizar na produção de bioenergia. Neste sentido, as culturas de biomassa escolhidas para o futuro da produção da bioenergia devem ser selecionadas com cuidado, com respeito pelas suas pressões ambientais e pelo seu potencial para influenciar positivamente a paisagem e a qualidade da biodiversidade.

Outro possível impacto resulta da utilização de espécies não autóctones para produção de biomassa. Caso tal se verifique há um consequente risco de invasão florestal em detrimento das espécies nativas relativamente às usadas nas culturas de biomassa, podendo alterar significativamente o ecossistema (Wilcove *et al.* 1998; Crooks 2002).

Relativamente à produção de gases de efeito de estufa, estudos realizados (Fargione *et al.*, 2010) mostram que as emissões de gases de estufa para a atmosfera por queima de biomassa dependem do tipo de biomassa em causa. Alguns tipos de biomassa, quando mal queimados, libertam fuligem (negro de fumo), que absorve eficientemente luz do espectro visível, aumentando a temperatura da atmosfera (Ramanathan e Carmichael, 2008). Contudo, o recurso à queima de biomassa continua a ser um processo com menores emissões que a queima de combustíveis fósseis e, por isso, permanece como uma boa alternativa para muitas aplicações.

A par das desvantagens descritas é necessário ter em conta as dificuldades tecnológicas existentes no que toca à exploração energética da biomassa. Dos processos mencionados (combustão, gaseificação, fermentação, respiração anaeróbia, produção de biodiesel e pirólise), a melhor maneira de converter a biomassa em energia dá-se através dos mecanismos de combustão (Demirbas, 2007), pois estes apresentam-se como processos que levam a menores investimentos de implementação e pelos quais se obtém maiores rendimentos energéticos. Porém, a quantidade e qualidade de energia obtida não é suficiente para responder às exigências mundiais, e a exploração intensiva da biomassa ultrapassa, certamente, a capacidade de produção deste recurso. Dadas as condicionantes ambientais e territoriais explicadas, a exploração da biomassa apresenta as suas limitações, apesar da sua elevada importância.

Face às vantagens e desvantagens da utilização da biomassa, conclui-se que a exploração do seu potencial energético deverá seguir princípios do desenvolvimento ambiental sustentável. Caberá a cada país, avaliar as condições e recursos naturais que dispõe e implementar soluções objetivas e devidamente estruturadas, que não comprometam nem o meio ambiente existente nem a própria saúde humana.

1.5 Queima de biomassa

A biomassa apresenta um poder calorífico significativamente mais baixo que a maioria da matéria proveniente do carvão, devido essencialmente à sua humidade. Tal não significa forçosamente que a temperatura de chama obtida seja baixa, visto que se a mistura conter elevados teores de oxigénio, a temperatura de chama será considerável. A queima de biomassa está também associada à libertação de grandes quantidades de matéria volátil, mais do que no carvão (Demirbas, 2003).

A combustão é, portanto, uma série de reações químicas exotérmicas nas quais a biomassa reage com o oxigénio existente no ar, resultando a consequente libertação de luz e calor, e na qual se podem identificar várias fases distintas: aquecimento, secagem, pirólise, combustão da fase gasosa (voláteis) e por fim, combustão do resíduo sólido carbonoso (carvão). Estas fases dependem tanto das propriedades físicas e químicas da biomassa a queimar como das condições ambiente em que a combustão ocorre. Assim, as dimensões das partículas do combustível, a sua composição, como, por exemplo, o seu teor em componentes gasosos, a taxa de aquecimento da biomassa, a temperatura do meio ambiente e a alimentação de ar existente, são parâmetros que influenciam os três estágios descritos.

As propriedades de combustão de biomassa determinam o seu uso e as correspondentes técnicas de exploração. Estas propriedades podem ser classificadas em:

- Macroscópicas: tamanho das partículas, massa, humidade contida, poder calorífico, densidade, temperatura de fusão, porosidade, etc.
- Microscópicas: composição química, composição mineral, propriedades térmicas (calor específico, condutividade térmica, emissividade), propriedades químicas.

Na Tabela 4 são apresentadas algumas propriedades para vários tipos de combustíveis.

Tabela 4 - Propriedades de combustíveis de biomassa

Adaptado de Demirbas (2007)

Combustível	Humidade %	Cinzas %	Poder calorífico superior (MJ/kg)
Cascas de amêndoa	7,5	2,9	19,8
Amêndoa	8,0	5,8	20,0
Madeira de faia	6,5	0,6	19,6
Cascas de avelã	7,2	1,4	19,5
Madeira de carvalho	6,0	1,7	19,8
Casca de carvalho	5,6	9,1	22,0
Caroços de azeitona	7,0	1,8	22,0
Casca da oliveira	6,8	2,1	21,8
Cascas de pistácio	8,1	1,3	19,9
Palha de arroz	11,2	19,2	18,7
Madeira de abeto	6,7	0,5	20,5
Switchgrass	13,1	5,9	19,9
Palha de trigo	6,4	8,1	19,3

Estas características variam não só com o tipo de biomassa, mas também com as condições em que esta é obtida e tratada. A composição da biomassa é um fator de extrema importância não só pelas razões apresentadas mas também devido a alguns constituintes inorgânicos, responsáveis por problemas nas instalações. Muitos metais alcalinos e alcalino-terrosos quando combinados com alguns elementos provenientes dos combustíveis, tais como sílica e enxofre, são responsáveis por reações indesejáveis dentro das fornalhas (Demirbas, 2007).

Se existir deficiência de oxigénio durante a combustão forma-se demasiada matéria resultante de uma queima incompleta, mas se existir excesso de ar, ocorre o arrefecimento do

sistema. A necessidade de ar depende das propriedades físicas e químicas do combustível. A queima de biomassa relaciona fatores como a velocidade de queima de combustível, os produtos de combustão, as temperaturas atingidas e a quantidade de ar necessária para uma queima completa.

A combustão de partículas sólidas de combustível (carbono) envolve, de um modo geral, as seguintes fases:

- Difusão do oxigénio até à superfície do combustível (partícula);
- Absorção do oxigénio pela superfície da partícula;
- O oxigénio absorvido reage com o sólido formando vários produtos;
- Os produtos formados são libertados (dessorção) da superfície e difundidos para longe desta.

Dos vários passos mencionados, que se observam na combustão, aquele que se manifesta mais lento, será o processo que irá controlar a taxa de queima. Assim, pode-se ter uma queima controlada pela difusão do oxigénio para a superfície da partícula, ou através da cinética da reação heterogénea do oxigénio com o carbono (característica quando a temperatura da partícula é baixa, menor que 800 °C, ou a partícula é de pequena dimensões) (Demirbas, 2007; Pinho, 2011). Para uma melhor perceção sobre a mecânica do controlo de queima relacionado com o tamanho da partícula e respetiva temperatura, na Figura 8 está representada a variação da concentração de oxigénio com o tamanho da partícula e a variação da taxa de queima com a temperatura, para cada um dos processos de controlo.

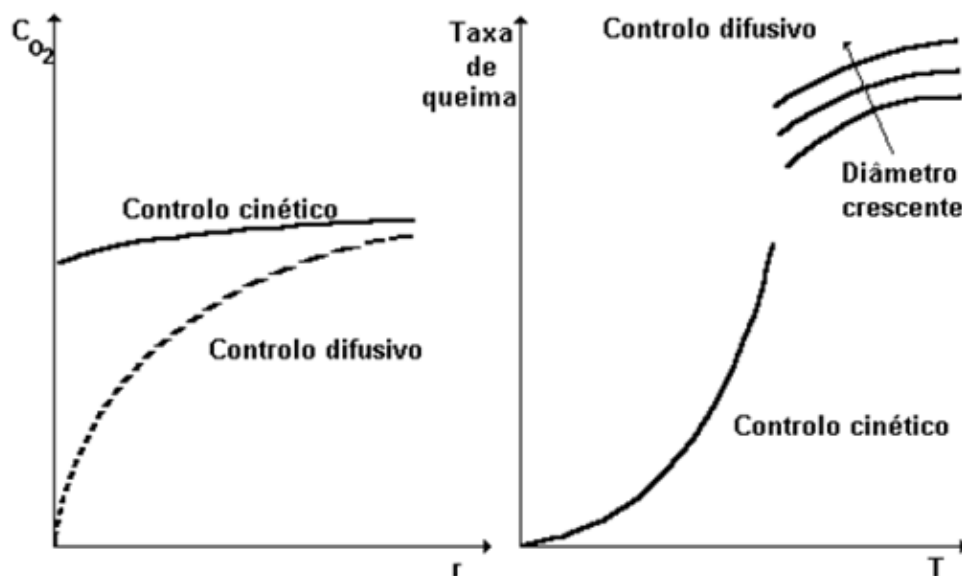


Figura 8 - Tipos de perfis da concentração de O_2 em torno de uma partícula esférica (Pinho, 2011)

De um modo geral, neste processo, a biomassa perde durante a secagem grande parte da sua humidade, após esta etapa ocorre a libertação de matéria volátil (metano e outros hidrocarbonetos leves) que correspondem a cerca de 80% do poder calorífico da biomassa. Grande parte das reações de combustão ocorrem em fase gasosa devido às altas temperaturas.

Por fim, resta apenas um resíduo carbonoso e cinzas (cerca de 20% da massa inicial) (Pinho, 2011).

No presente caso em estudo, a queima de biomassa será analisada, em termos teóricos, como queima de cargas de partículas (peletes de madeira) que serão lançadas numa fornalha, onde secam, pirolisam (assumindo que a maioria dos voláteis sai sob a forma de propano), deixando um resíduo sólido a queimar. Trata-se, portanto, de um processo de combustão de leito fixo, onde se assume que a combustão da matéria volátil ocorre instantaneamente, isto é, à taxa a que a biomassa é introduzida no leito, ao passo que a queima de resíduo sólido carbonoso, resultante da pirólise inicial da biomassa, se irá processar de um modo mais lento em função da interação entre a cinética e a difusão.

2 Combustão de biomassa - Peletes

2.1 Densificação de biomassa

É através da densificação da biomassa que se consegue aumentar a sua densidade e melhorar a sua qualidade energética por unidade de volume. As vantagens deste processo prendem-se fundamentalmente com o aumento da energia libertada durante a sua combustão, aumentando a eficiência dos processos associados. Por exemplo, no caso da combustão permite uma queima mais completa, contribuindo também para a redução de custos associados ao transporte de biomassa para locais remotos, custos de armazenamento e processamento, visto que se passa a ter um recurso energético mais concentrado. Porém, quanto mais fina e densa se torna a biomassa, também os gastos energéticos para o fazer aumentam, devendo-se adequar o tamanho sempre à necessidade. (Oberberger e Thek, 2010). Tal permite, também, que a durabilidade e estabilidade da biomassa melhore.

A densificação da biomassa pode ser distinguida pelos seguintes processos:

1. Prensagem: a biomassa é comprimida numa câmara de aço e é cortada (previamente ou posteriormente) num tamanho e forma uniformes;
2. Extrusão: a biomassa é forçada a passar numa fieira em condições controladas. Existem vários tipos de extrusão:
 - Extrusão por prensagem: um pistão em movimento alternado, conduz porções da biomassa, que vai sendo colocada numa câmara, até à fieira, usando a redução de volume da câmara, devido ao seu movimento, para comprimir a matéria;
 - Extrusão por parafuso: é usado um parafuso que força a alimentação de biomassa sobre alta pressão para a fieira. Existem três casos: extrusão por parafusos cônicos, extrusão com matriz aquecida e extrusão por parafuso duplo;
 - Peletização: uma matriz de aço em forma de tambor, perfurada densamente ao longo do seu perímetro com furos de 0,3-1,3 cm de diâmetro que roda contra um rolo de pressão, forçando a passagem da biomassa pelos furos. Conseguem-se assim formar pequenas partículas cilíndricas com comprimentos na ordem dos 3 cm.
3. Briquetização: dois rolos, que rodam em direções opostas, compactam biomassa triturada, formando pequenos toros com dimensões médias de 2 cm.

A escolha dos processos de densificação da biomassa mencionados dependem, portanto, da composição da biomassa, do tamanho do produto final e da sua forma. Estas características são afetadas pela temperatura, pressão de aplicação, pela humidade contida na biomassa, pré-tratamentos e características bioquímicas da matéria.

2.2 Peletes e briquetes

As peletes de madeira e briquetes são biocombustíveis sólidos de qualidade consistente (produtos processados a partir de biomassa). Estes consistem em pequenos cilindros de madeira prensada, usados como combustível e que resultam essencialmente do processamento industrial de madeira. Contudo podem ser fabricadas também peletes a partir da compressão de biomassa de fontes distintas da madeira, desde que sejam devidamente moída e seca, antes de serem utilizados.

O diâmetro das peletes ronda em média 3-8 mm e têm um comprimento de 10-30 mm, o seu teor em humidade é reduzido (7-12%), o teor em cinzas é baixo (0,5%) e tem uma massa volúmica de 650-700 kg/m³. O poder calorífico das peletes encontra-se entre os 4,7 a 5,0 kWh/kg (16,9 a 18 MJ/kg), o que significa que a energia contida será 3.000 a 3.300 kWh por m³ a granel. Uma tonelada de peletes corresponde sensivelmente a 1,5 m³ de espaço de armazenamento e é equivalente a 470-500 litros de fuel óleo leve. Quando expostas à água, as peletes desintegram-se, significando que as mesmas, deverão ser mantidas em ambientes secos pois não aguentam humidade.

Por sua vez as briquetes provenientes de madeira são peletes com um maior formato, o seu diâmetro ronda os 50-80 mm. Durante a compressão, a humidade da madeira é menos que 15%. A massa volúmica seca deste tipo de briquetes é em média 1.000 kg/m³ para uma dada partícula. Devido ao seu maior tamanho e formato, as briquetes não são a melhor opção quando se pretende uma alimentação automática de pequenas unidades de combustível para queima e, mesmo para grandes quantidades de combustível, partem-se antes da combustão, o que leva a uma maior aposta nas peletes por parte dos construtores deste tipo de sistemas de queima.

Atualmente existe um grande interesse neste mercado, onde são estudados várias opções no que toca à composição das peletes, consoante o tipo de queima que se pretende. Isto é, mediante o fim do uso das peletes a sua composição deverá ser tal que maximize rendimentos energéticos e económicos. Assim, o tipo de matéria-prima para o fabrico de peletes, consoante a sua disponibilidade e acesso, o seu poder calorífico e o modo de processamento energético ao qual se destinam, são fatores que devem ser cautelosamente estudados.

Na Tabela 5 são resumidas as características físicas mais importantes das peletes e efetuadas algumas comparações com outros géneros de combustíveis.

Tabela 5- Características das peletes
Adaptado de Saracoglu e Gunduz (2009)

Características	Especificações
Tamanho	Diâmetro 6-10 mm, comprimento 10-30 mm
Poder energético	4.7-5.0kWh/kg (16.9-18.0 MJ/kg)
Humidade	7-12%
Cinzas	~0,5%
Matéria Prima	Madeira, serradura, aparas de corte
Massa volúmica	650-700 kg/m ³
Volume específico a granel	1,5 m ³ /kg

2.3 Fabrico de peletes

O fabrico de peletes normalmente segue as seguintes etapas:

- Secagem;
- Moagem;
- Condicionamento;
- Peletização;
- Arrefecimento;
- Separação;
- Armazenamento.

A secagem não será necessária se a matéria a utilizar for pouco húmida (por exemplo aparas de madeira, ou pó de madeira), porém, caso exista bastante humidade deverá passar por este processo antes de ser moída. Ao ser moída a matéria é reduzida ao tamanho de grão, com as dimensões, pelo menos, do diâmetro da pelete. Porém, também não se deve reduzir demasiado o tamanho de grão, de modo a que se consiga uma ligação coesa entre as partículas constituintes do mesmo. A secagem e moagem do material têm um papel importante no fabrico dos peletes, pois são estas etapas que determinam a homogeneização do material, ou seja, o tamanho das partículas e a sua constituição deverão ser uniformes (Saracoglu e Gunduz, 2009).

Antes de se proceder à peletização, muitas vezes refina-se a matéria a ser tratada, de modo a eliminar irregularidades, para obter uma mistura de material bem homogénea. Este

processo chama-se condicionamento, faz-se através de vapor e permite também regular a humidade da matéria.

A matéria é então comprimida em matriz vertical ou horizontal por meio de rolos. A matriz vai sendo alimentada por material e os rolos pressurizam a matéria de dentro da matriz para fora. Esta ao sair pelos furos da matriz, acaba por partir-se em vários pedaços de tamanhos irregulares ou, caso se pretenda, em tamanhos uniformes usando um sistema de corte.

O rácio de pressão (rácio entre o diâmetro dos furos e o comprimento do canal) juntamente com o tipo de material em uso determinam a fricção que é feita dentro da matriz. Por esse motivo, deve ser bem escolhido o rácio consoante o material que se está a usar, para que se obtenha boa qualidade de peletes e uma boa taxa de saída de material, pois se estiver a usar material com pouca capacidade adesiva, terá que usar um canal maior (o tamanho do canal é o único parâmetro que se pode alterar, o diâmetro do furo apenas dá o diâmetro do pelete) que, por sua vez, implica peletes mais duros e maiores temperaturas de trabalho. É por este motivo que muitos equipamentos apenas permitem peletizar materiais restritos.

Após peletização o material é arrefecido por meio de ar. Após o processo de densificação, este pode sair a uma temperatura de 80 a 130 °C. Este arrefecimento contribui para o aumento da durabilidade mecânica das peletes (Oberberger e Thek, 2010). Na Figura 9 está esquematizado o processo de fabrico de peletes.

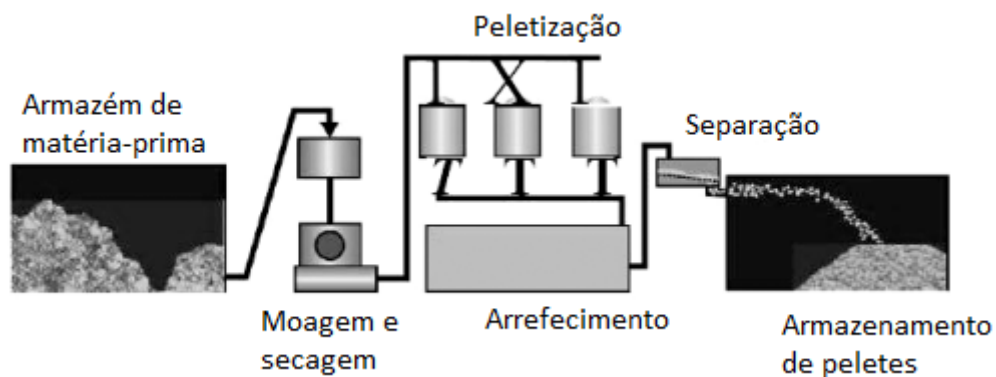


Figura 9 - Esquematização do fabrico de peletes

Adaptado de Saracoglu e Gunduz (2009)

3 Modelo matemático de queima

No presente trabalho, o modelo adotado para o estudo da queima de partículas de peletes em leito fixo será desenvolvido tendo por base o modelo matemático de Kanury (1975) sobre a combustão de uma partícula sólida de carbono. Partindo de uma alteração ao modelo inicialmente desenvolvido por este autor passa-se a considerar a influência da cinética e da transferência de massa no controlo da reação e daí passa-se ao modelo para a queima em regime permanente em leito fixo (Pinho, 2014).

3.1 Queima de uma partícula sólida contabilizando a influência da cinética e da transferência de massa.

Tomando a equação da continuidade em coordenadas esféricas, considerando que o processo é em regime permanente, que só há transferência de massa na direção radial e, finalmente, tendo em atenção que a espécie química em consideração nesta análise é o oxigénio,

$$D_{O_2} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial r} \right) \right] = V_r \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial r} \quad (1)$$

e como se afirmou que haveria unicamente transferência de massa segundo a direção r ,

$$D_{O_2} \left[\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\rho_{O_2}}{dr} \right) \right] = V_r \frac{d\rho_{O_2}}{dr} \quad (2)$$

Neste desenvolvimento vai-se admitir que D_{O_2} e ρ_{O_2} são constantes e que $\rho_{O_2} = Y_{O_2} \rho_g$, onde Y_{O_2} é a fração mássica de oxigénio e ρ_g é a massa volúmica da fase gasosa que envolve a partícula sólida em combustão.

$$D_{O_2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\rho_{O_2}}{dr} \right) - v_r r^2 \frac{d\rho_{O_2}}{dr} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dr} \left(D_{O_2} r^2 \frac{d\rho_{O_2}}{dr} \right) - v_r r^2 \frac{d\rho_{O_2}}{dr} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dr} \left(D_{O_2} r^2 \rho_g \frac{dY_{O_2}}{dr} \right) - v_r r^2 \rho_g \frac{dY_{O_2}}{dr} = 0 \quad (5)$$

Ora,

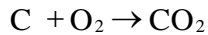
$$\dot{m}_g = \rho_g v_r 4 \pi r^2 \quad (6)$$

e sendo o processo em regime permanente $\dot{m}_g = \rho_g v_r 4 \pi r^2 = \text{constante} = 4 \pi r^2 \dot{m}_g''$ onde $\dot{m}_g'' = \rho_g v_r$. Então será igualmente verdade que $r^2 \dot{m}_g'' = \text{constante}$, de modo que,

$$\frac{d}{dr} \left(D_{O_2} r^2 \rho_g \frac{dY_{O_2}}{dr} \right) - [\dot{m}_g'' r^2] \frac{dY_{O_2}}{dr} = 0 \quad (7)$$

À superfície da partícula de carbono chegará o O_2 . Há então duas possibilidades em termos de reação química, ou o carbono queima a CO e este, por sua vez, queima a CO_2 longe da partícula, ou então a queima do CO a CO_2 dá-se imediatamente após a formação do CO. Mais adiante entrar-se-á com a consideração das duas hipóteses que se põem na prática (Pinho 2011), queima do carbono a CO seguida da conversão imediata deste composto em CO_2 , ou só queima a CO, com a oxidação deste a CO_2 longe da partícula.

Portanto, no imediato ter-se-á



$$12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 44 \text{ kg}$$

em termos de balanço mássico à superfície da partícula, enquanto na Figura 10 se mostram os fluxos mássicos que ocorrem nessa mesma superfície da partícula.

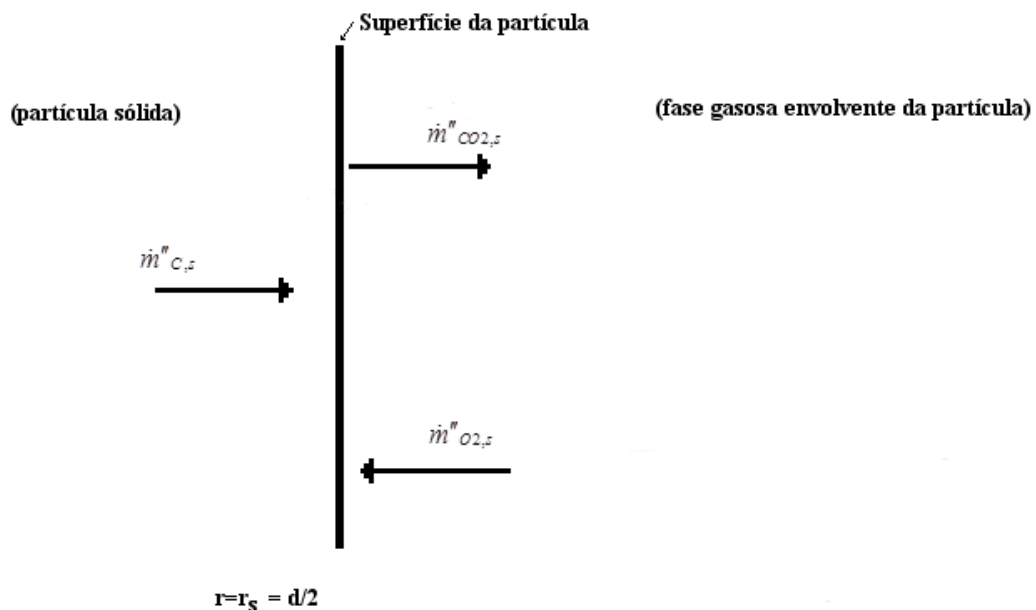


Figura 10 - Superfície da partícula durante a combustão.

À superfície da partícula verifica-se que,

$$\dot{m}''_{O_{2,s}} = -\rho_g D_{O_2} \left. \frac{dY_{O_2}}{dr} \right|_s + \dot{m}''_{C,s} Y_{O_{2,s}} \quad . \quad (8)$$

Nesta equação o fluxo mássico que aparece na segunda parcela do segundo membro é $\dot{m}''_{C,s}$ porque olhando-se para a figura se constata que o fluxo mássico líquido que existe na fase gasosa, e junto à superfície da partícula,

$$\dot{m}''_{líquido} = \dot{m}''_{CO_{2,s}} - \dot{m}''_{O_{2,s}} \Leftrightarrow \dot{m}''_{C,s} = \dot{m}''_{CO_{2,s}} - \dot{m}''_{O_{2,s}} \quad . \quad (9)$$

Os vários fluxos mássicos poderão ser relacionados através da estequiometria da reação. Definindo-se,

$$f_c = \frac{12}{32} \quad (10)$$

como a massa de carbono por massa de oxigénio

$$\dot{m}''_{O_{2,s}} = -\frac{\dot{m}''_{C,s}}{f_c} \quad (11)$$

e substituindo isto na equação (8),

$$-\frac{\dot{m}''_{C,s}}{f_c} = -\rho_g D_{O_2} \left. \frac{dY_{O_2}}{dr} \right|_s + \dot{m}''_{C,s} Y_{O_{2,s}} \quad (12)$$

$$\frac{\dot{m}''_{C,s}}{F_c} = \left(\rho_g D_{O_2} \left. \frac{dY_{O_2}}{dr} \right|_s - \dot{m}''_{C,s} Y_{O_{2,s}} \right) \quad . \quad (13)$$

Esta equação (13) é uma condição de fronteira verificada na parede da partícula.

Retomando agora a equação (7),

$$\frac{d}{dr} \left(D_{O_2} r^2 \rho_g \frac{dY_{O_2}}{dr} \right) - [\dot{m}''_C r^2] \frac{dY_{O_2}}{dr} = 0 \quad (14)$$

onde o \dot{m}''_g foi substituído por \dot{m}''_C que é o valor líquido do fluxo mássico na fase gasosa em torno da partícula ($\dot{m}''_{líquido} = \dot{m}''_C$), como antes se explicou. Portanto, devido à condição da continuidade, o fluxo líquido de massa que se afasta da partícula é o fluxo de carbono e $[\dot{m}''_C r^2]$ é constante.

Integrando a equação (14) uma primeira vez obtém-se uma constante de integração K_1

$$D_{O_2} \rho_g r^2 \frac{dY_{O_2}}{dr} - [\dot{m}''_{C,r} r^2] Y_{O_2} = K_1 \quad . \quad (15)$$

Para a determinação da constante de integração K_1 aplica-se esta equação (15) para $r = r_s$ e usa-se a condição de fronteira (13)

$$D_{O_2} \rho_g r_s^2 \left. \frac{dY_{O_2}}{dr} \right|_s - [\dot{m}''_{C,s} r_s^2] Y_{O_2,s} = K_1 \quad . \quad (16)$$

Pondo r_s^2 em evidência,

$$r_s^2 \left[D_{O_2} \rho_g \left. \frac{dY_{O_2}}{dr} \right|_s - (\dot{m}''_{C,s} Y_{O_2,s}) \right] = K_1 \quad (17)$$

e então constata-se, pela combinação das equações (13) e (16) que,

$$K_1 = \frac{r_s^2 \dot{m}''_{C,s}}{F_C} \quad . \quad (18)$$

Voltando então à equação diferencial (15) e introduzindo (18),

$$D_{O_2} \rho_g r^2 \frac{dY_{O_2}}{dr} - [\dot{m}''_{C,r} r^2] Y_{O_2} = \frac{r_s^2 \dot{m}''_{C,s}}{f_C} \quad (19)$$

ou como, $\dot{m}''_{C,r} r^2 = \dot{m}''_{C,s} r_s^2$, pela condição de continuidade,

$$D_{O_2} \rho_g r^2 \frac{dY_{O_2}}{dr} - [\dot{m}''_{C,s} r_s^2] Y_{O_2} = \frac{r_s^2 \dot{m}''_{C,s}}{f_C} \quad . \quad (20)$$

Trabalhando um pouco esta equação,

$$r^2 \rho_g D_{O_2} \frac{dY_{O_2}}{dr} - [\dot{m}''_{C,s} r_s^2] \left(Y_{O_2} + \frac{1}{f_C} \right) = 0 \quad . \quad (22)$$

Separando variáveis e integrando entre $(r = r \text{ e } Y_{O_2} = Y_{O_2})$ e $(r \rightarrow \infty \text{ e } Y_{O_2} = Y_{O_2,\infty})$, obtém-se,

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2} + 1/f_C}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_C} \right) = - \frac{[\dot{m}''_{C,s} r_s^2]}{\rho_g D_{O_2}} \frac{1}{r} \quad . \quad (23)$$

Havendo competição entre a cinética e difusão verifica-se um valor finito para a concentração do oxigénio à superfície da partícula, ou seja, $Y_{O_2,s} \neq 0$. Repare-se que no

desenvolvimento de Kanury (1975) este assume controlo difusivo para a combustão, ou seja, a cinética à superfície da partícula é infinitamente rápida e por isso, $Y_{O_2,s} = 0$. Aqui não, assume-se um valor finito, $Y_{O_2,s} \neq 0$ (Pinho, 2014). Então a equação (23) fica,

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2,s} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) = - \frac{\dot{m}''_{C,s} r_s^2}{\rho_g D_{O_2}} \frac{1}{r_s} \quad (24)$$

A taxa de consumo de carbono da partícula é função da concentração do O_2 à sua superfície,

$$\dot{m}_C = \pi d^2 k_c C_{O_2,s} \quad (25)$$

$$\dot{m}_C = 4 \pi r_s^2 k_c C_{O_2,s} \quad (26)$$

$$\dot{m}_C = 4 \pi r_s^2 M_C k_c C_{O_2,s} \quad (27)$$

onde k_c é a constante da taxa da reação em fase heterogénea ($C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$) em [m/s].

Assumindo para o oxigénio um comportamento de gás perfeito, $pV = n\bar{R}T$

$$C = \frac{n}{V} = \frac{p}{\bar{R}T} \Rightarrow C_{O_2,s} = \frac{p_{O_2,s}}{\bar{R}T} \quad (28)$$

Por outro lado $pV = mRT$ leva a que,

$$\rho_{O_2,s} = \frac{m}{V} = \frac{p_{O_2,s} M_{O_2}}{\bar{R}T} \quad (29)$$

e dividindo membro a membro as equações (28) e (29),

$$C_{O_2,s} = \frac{\rho_{O_2,s}}{M_{O_2}} \quad (30)$$

Voltando agora à equação de \dot{m}_C , equação (27),

$$\dot{m}_C = 4 \pi r_s^2 M_C k_c \frac{\rho_{O_2,s}}{M_{O_2}} \quad (31)$$

tira-se,

$$\dot{m}''_{C,s} = \frac{\dot{m}_C}{4 \pi r_s^2} = \frac{M_C}{M_{O_2}} k_c \rho_{O_2,s} \quad (32)$$

ou

$$\dot{m}''_{c,s} = \frac{M_c}{M_{O_2}} k_c \rho_g Y_{O_2,s} \quad . \quad (33)$$

A estratégia seria agora a de se proceder à combinação das equações (24) e (33) para se eliminar $Y_{O_2,s}$. Porém, a resolução analítica será impossível a menos que se façam algumas simplificações. Por isso vai-se avaliar a possibilidade de se desenvolver em Série de Taylor o logaritmo da equação (24). Relembra-se que para uma função $f(x)$ o desenvolvimento em Série de Taylor no ponto a é dado por,

$$f(x) = f(a) + \frac{(x-a)}{1} f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2!} f''(a) + \dots \quad (34)$$

Para $a = 0$ este desenvolvimento é conhecido como a Série de Maclaurin,

$$f(x) = f(0) + \frac{x}{1} f'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \dots \quad (35)$$

Pretende-se então desenvolver

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2,s} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) \quad (36)$$

em série. Para tal sabe-se que $0 \leq Y_{O_2} \leq Y_{O_2,\infty}$ e ainda que $0 \leq Y_{O_2,\infty} \leq 0,23$, onde 0,23 é o valor máximo possível para a fração mássica do oxigénio se a combustão ocorrer no seio do ar. Como se pretende conhecer $Y_{O_2,s}$ que em princípio toma um valor reduzido, vai-se efetuar o desenvolvimento em série para $Y_{O_2,s} = 0$. Então,

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2,s} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) = \ln \left(\frac{0 + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) + Y_{O_2,s} \frac{d}{dY_{O_2,s}} \left[\ln \left(\frac{Y_{O_2,s} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) \right] \Big|_{Y_{O_2,s}=0} \quad . \quad (37)$$

Atendendo agora a que para $y = \ln u$, $y' = u'/u$, obtém-se,

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2,s} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) \approx \ln \left(\frac{1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) + f_c Y_{O_2,s} \quad . \quad (38)$$

Para se quantificar o erro inerente a esta aproximação, pois só foram considerados os dois primeiros termos da série, vão se calcular valores para os dois membros da igualdade anterior em duas situações concretas.

Considera-se $Y_{O_2,\infty}=0,23$ que é a fração mássica do oxigénio no ar atmosférico e tenha-se ainda em conta a estequiometria da combustão, $f_c=12/32 \Rightarrow 1/f_c=32/12$. Assumindo, por exemplo, que $Y_{O_2,s}=0,01$ (1 % em massa), os cálculos dão,

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) = \ln \left(\frac{0,01 + 32/12}{0,23 + 32/12} \right) = -0,07898$$

e

$$\ln \left(\frac{1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) + f_c Y_{O_2} = \ln \left(\frac{32/12}{0,23 + 32/12} \right) + \frac{12}{32} 0,01 = -0,07897$$

Tomando-se agora $Y_{O_2,s}=0,1$ (10 % em massa), mantendo os restantes valores

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) = \ln \left(\frac{0,1 + 32/12}{0,23 + 32/12} \right) = -0,04591$$

e

$$\ln \left(\frac{1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) + f_c Y_{O_2} = \ln \left(\frac{32/12}{0,23 + 32/12} \right) + \frac{12}{32} 0,1 = -0,04522$$

No primeiro caso o erro é de

$$\frac{0,07898 - 0,07897}{0,07898} = 0,013 \%$$

enquanto no segundo caso é de

$$\frac{0,04591 - 0,04522}{0,04591} = 7,4 \%$$

Destas duas condições consideradas a primeira é a mais realista do que segunda, pois na prática é pouco provável que à superfície de uma partícula em combustão a fração mássica de

oxigénio possa atingir os 10 %. A aplicação deste desenvolvimento em série ao logaritmo leva por isso a um erro pouco significativo.

Retomando agora a equação (24)

$$\ln \left(\frac{Y_{O_2,s} + 1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) = - \frac{\dot{m}''_{C,s} r_s^2}{\rho_g D_{O_2}} \frac{1}{r_s} \quad (39)$$

e adotando a aproximação sugerida pela equação (38), fica

$$\ln \left(\frac{1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) + f_c Y_{O_2,s} = - \frac{\dot{m}''_{C,s} r_s}{\rho_g D_{O_2}} \quad (40)$$

Pegando agora na equação (33) e substituindo o $\dot{m}''_{C,s}$ daí obtido, na equação (40), obtém-se,

$$\frac{M_C}{M_{O_2}} k_c \rho_g Y_{O_2,s} = - \frac{\rho_g D_{O_2}}{r_s} \left[\ln \left(\frac{1/f_c}{Y_{O_2,\infty} + 1/f_c} \right) + f_c Y_{O_2,s} \right] \quad (41)$$

e resolvendo em ordem a $Y_{O_2,s}$ chega-se a

$$Y_{O_2,s} = \frac{\ln (f_c Y_{O_2,\infty} + 1)}{\left(f_c + \frac{M_C k_c r_s}{M_{O_2} D_{O_2}} \right)} \quad (42)$$

Esta expressão de $Y_{O_2,s}$ pode agora ser introduzida na equação (40). Repare-se que se não se tivesse aplicado o desenvolvimento em Série de Maclaurin não teria sido possível este desenvolvimento analítico. A combinação das equações (40) e (42) leva a uma equação para $\dot{m}''_{C,s}$, que é apenas função da concentração do oxigénio no infinito, isto é, longe da partícula.

$$\dot{m}''_{C,s} = \ln (f_c Y_{O_2,s} + 1) \frac{\rho_g D_{O_2}}{r_s} \left(\frac{1}{\frac{M_{O_2} f_c D_{O_2}}{M_C k_c r_s} + 1} \right) \quad (43)$$

Relembrando que $m_C = 4 \pi r_s^2 \dot{m}''_{C,s}$, obtém-se

$$\dot{m}_C = 4 \pi r_s^2 \rho_g \left(\frac{1}{\frac{M_{O_2} f_C}{M_C k_c} + \frac{r_s}{D_{O_2}}} \right) \ln (f_C Y_{O_2, \infty} + 1) . \quad (44)$$

Porém pode ainda ser feita mais uma aproximação. Considerando-se que $\ln (f_C Y_{O_2, \infty} + 1) \approx f_C Y_{O_2, \infty}$, então,

$$\dot{m}_C = 4 \pi r_s^2 \rho_g f_C Y_{O_2, \infty} \left(\frac{1}{\frac{M_{O_2} f_C}{M_C k_c} + \frac{r_s}{D_{O_2}}} \right) . \quad (45)$$

Sabendo que $\rho_g Y_{O_2, \infty} = \rho_{O_2, \infty}$ e que $4 \pi r_s^2 = \pi d^2$ ou seja $r_s = d/2$ onde d é o diâmetro equivalente da partícula a queimar,

$$\dot{m}_C = \pi d^2 \rho_{O_2, \infty} \frac{1}{\left(\frac{M_{O_2}}{M_C k_c} + \frac{d}{2 f_C D_{O_2}} \right)} . \quad (46)$$

Como $\rho_{O_2, \infty} = M_{O_2} C_{O_2, \infty}$ e ainda $f_C = M_C / M_{O_2}$, obtém-se

$$\dot{m}_C = \pi d^2 M_C C_{O_2, \infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{k_c} + \frac{d}{2 D_{O_2}} \right)} . \quad (47)$$

Por outras palavras,

$$\dot{m}_C = \pi d^2 M_C K_{glo} C_{O_2, \infty} \quad (48)$$

e conclui-se que,

$$\frac{1}{K_{glo}} = \frac{1}{k_c} + \frac{d}{2 D_{O_2}} . \quad (49)$$

Mas atenção, D_{O_2} não é a difusividade do O_2 nos gases de combustão, mas sim uma difusividade aparente pois a partícula a queimar faz parte de um empilhamento de partículas a queimar. D_{O_2} só seria igual à difusividade do oxigénio nos gases para uma partícula isolada a queimar em difusão pura. Por outras palavras, ver por exemplo Avedesian e Davidson (1976),

$$D_{O_2} = \frac{Sh D_g}{2} . \quad (50)$$

Em difusão pura $Sh = 2$ e por isso $D_{O_2} = D_g$. Introduzindo (50) em (47) ficará,

$$\dot{m}_C = \pi d^2 M_C \frac{1}{\frac{1}{k_c} + \frac{d}{Sh D_g}} C_{O_2, \infty} \quad (51)$$

ou seja,

$$\frac{1}{K_{glo}} = \frac{1}{k_c} + \frac{d}{Sh D_g} \quad (52)$$

o que equivale novamente a,

$$\dot{m}_C = \pi d^2 M_C K_{glo} C_{O_2, \infty} \quad (53)$$

A difusividade D_g é que é a difusividade real do oxigénio no seio dos gases de combustão.

Seria conveniente avaliar-se o peso da última simplificação $\ln(f_C Y_{O_2, \infty} + 1) \approx f_C Y_{O_2, \infty}$. Relembrando que, $f_C = 12/32$ e considerando novamente duas hipóteses, $Y_{O_2, \infty} = 0,23$ e $Y_{O_2, \infty} = 0,1$, obtém-se para a primeira hipótese,

$$\ln \left(\frac{12}{32} 0,23 + 1 \right) = 0,08273$$

e

$$\frac{12}{32} 0,23 = 0,08625$$

o que dá um erro de,

$$\frac{0,08273 - 0,08625}{0,08273} = -4,25 \%$$

enquanto que para a segunda hipótese,

$$\ln \left(\frac{12}{32} 0,10 + 1 \right) = 0,03681$$

e

$$\frac{12}{32} 0,10 = 0,03750$$

o que dá um erro de,

$$\frac{0,03681 - 0,03750}{0,03681} = -1,87 \% \quad .$$

Convém no entanto referir que o caso mais geral do modelo de queima se verifica quando são consideradas duas possibilidades da queima do carbono. A queima a CO e este imediatamente queima a CO₂ ainda junto ou muito perto da superfície da partícula, ou a queima apenas a CO à superfície e a queima deste a CO₂ longe da partícula. Então a resistência global à queima virá dada por,

$$\frac{1}{K_{glo}} = \frac{d}{i Sh D_g} + \frac{1}{k_c} \quad (54)$$

onde,

$i = 1$ para a queima a CO₂;

$i = 2$ para a queima a CO.

3.2 Queima em regime permanente de partículas sólidas em leito fixo.

Em pequenas caldeiras de combustíveis sólidos como é o caso das caldeiras domésticas a peletes de biomassa estas partículas são lançadas continuamente para um queimador em forma de cesto, verificando-se assim a queima das partículas em leito fixo. O ar de combustão entra principalmente pela parte inferior do cesto do queimador embora também existam algumas entradas laterais de ar. Para efeitos da análise teórica que se segue considera-se o esquema de princípio de funcionamento apresentado na Figura 11.

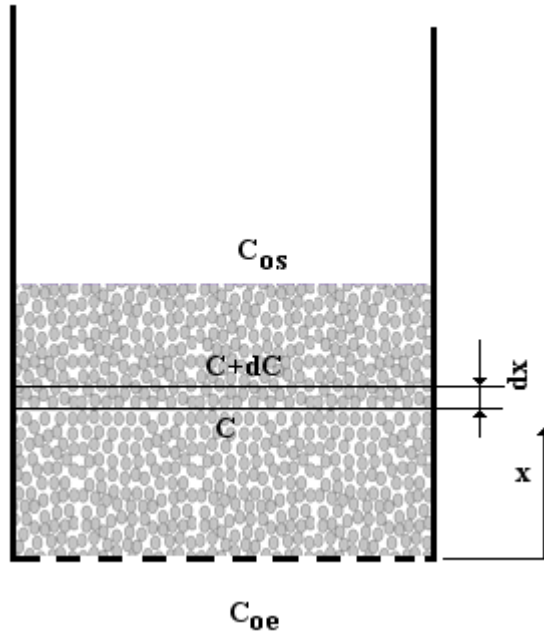


Figura 11 -Esquema da queima em leito fixo de partículas sólidas.

Assume-se portanto que o escoamento gasoso é em pistão. As partículas caem por gravidade na parte superior do leito e à medida que são consumidas vão se deslocando para a parte inferior deste. Ou seja, a corrente gasosa é ascendente enquanto que a corrente dos sólidos é descendente.

Considera-se que a zona de reação está a uma temperatura uniforme e que as restantes propriedades da fase gasosa que atravessa o leito em combustão são igualmente uniformes, com exceção da concentração do oxigénio que vai sendo reduzida à medida que a corrente gasosa ascende através do leito.

A fornalha é formada por uma infinidade de volumes elementares transversais, $dV = A dx$, conforme se indica na Figura 11.

Analisando o que se passa num volume elementar, dV , considera-se que neste existe um escoamento uniformemente misturado sendo a concentração de oxigénio no seu interior constante no tempo e igual a C_∞ . Uma partícula de diâmetro d que aí entra sofre uma queima elementar sendo a taxa da sua reação função do seu tamanho, da concentração molar de oxigénio e do mecanismo da reação da combustão. O tempo elementar associado à redução elementar do diâmetro da partícula $d(d)$ devido à combustão virá dado por,

$$\pi d^2 K_{gl} \eta C_\infty = - \frac{d}{dt} \left(\frac{\rho_c \pi d^3}{M_c 6} \right) \quad (68)$$

ou seja,

$$dt = - \frac{\rho_c}{2 K_{gl} M_c \eta C_\infty} d(d) \quad (69)$$

e como,

$$\frac{1}{K_{glo}} = \frac{d}{i Sh D_g} + \frac{1}{k_c} \quad (70)$$

resulta em

$$dt = -\frac{\rho_c}{2 M_c \eta C_\infty} \left[\frac{d}{i Sh D_g} + \frac{1}{k_c} \right] d(d) \quad (71)$$

Esta partícula faz parte de um empilhamento que está em combustão, ver Figura 11. Analisando uma fatia elementar desse empilhamento ou leito fixo, partículas deslocam-se de cima para baixo por ação da gravidade enquanto uma corrente gasosa ascendente transporta oxigénio. Cada kmol de carbono consome um kmol de oxigénio atendendo a que $C + O_2 \rightarrow CO_2$ e por isso segundo a Figura 12 n_{cl} é o número de kmol de C para uma partícula de diâmetro genérico d ,

$$n_{cl} = \frac{\rho_c \pi d^3}{M_c 6} \quad (72)$$

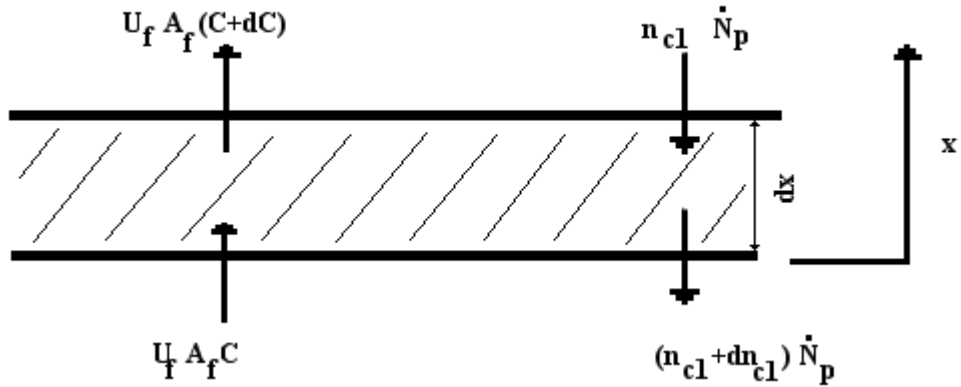


Figura 12 -Fatia do leito fixo.

E nessa fatia entra e sai um dado número de partículas na unidade de tempo. Como se assume que as partículas que entram no leito fixo são todas do mesmo tamanho e queimam a igual taxa, o número de partículas que atravessa uma dada seção do leito é constante no tempo, \dot{N}_p .

$$\dot{N}_p = \frac{6 \dot{m}_c}{\rho_c \pi d_i^3} = \frac{6 \dot{m}_{cx}}{\rho_c \pi d_{ix}^3} \quad (73)$$

\dot{N}_p é pois o caudal de partículas fornecido à fornalha sendo,

\dot{m}_c - o caudal mássico de carbono à entrada da fornalha;

\dot{m}_{cx} - o caudal mássico de carbono à entrada do elemento de volume dV ;

d_i - o diâmetro inicial das partículas à entrada da fornalha;

d_{ix} - o diâmetro das partículas à entrada do elemento de volume dV .

Fazendo o balanço ao oxigénio que entra na fatia elementar em questão, este será então dependente do carbono consumido nessa mesma fatia elementar, por outras palavras o que entre terá de ser igual ao que sai,

$$U_f A_f C + n_{c1} \dot{N}_p = U_f A_f (C + dC) + (n_{c1} + dn_{c1}) \dot{N}_p \quad (74)$$

Voltando ao balanço molar, equação (75)

$$-U_f A_f dC = \dot{N}_p dn_{c1} \quad (75)$$

mas

$$dn_{c1} = d \left(\frac{\rho_c \pi d^3}{6 M_c} \right) = \frac{\rho_c \pi d^2}{2 M_c} d(d) \quad (76)$$

Introduzindo as equações (73) e (76) na equação (75)

$$dC = - \frac{3 \dot{m}_c d^2}{U_f A_f M_c d_i^3} d(d) \quad (77)$$

Fica-se assim com um sistema de duas equações diferenciais formado pelas equações (71) e (77). Da integração da primeira equação poderá conhecer-se o tempo de queima da carga de partículas desde que se conheça a função $C_\infty = f(d)$. O conhecimento da variação da concentração molar de oxigénio com o diâmetro das partículas a queimar, ou o que é o mesmo, com a distância x ao longo da fornalha, passa pela integração prévia da equação (77). Integra-se por isso esta última equação,

$$\int dC = \int \left(- \frac{3 \dot{m}_c}{U_f A_f M_c d_i^3} \right) d^2 d(d) \quad (78)$$

o que dá,

$$C = - \frac{\dot{m}_c d^3}{U_f A_f M_c d_i^3} + K_1 \quad (79)$$

sendo K_1 a constante de integração. Para se obter o valor desta constante de integração basta atender a que para $d = (1 - \varphi)^{1/3} d_i$, $C = C_{oe}$, e daí

$$K_1 = C_{oe} + \frac{\dot{m}_c(1 - \varphi)}{U_f A_f M_c} . \quad (80)$$

Substituindo agora a equação (80) na equação (79) encontra-se a equação que define a dependência entre a concentração molar de oxigénio e o diâmetro das partículas no interior do leito,

$$C = \frac{\dot{m}_c}{U_f A_f M_c} \left[(1 - \varphi) - \frac{d^3}{d_i^3} \right] + C_{oe} . \quad (81)$$

No caso especial da queima ser completa na parte inferior do leito, isto é $\varphi = 1$,

$$C = \frac{\dot{m}_c}{U_f A_f M_c} \left(-\frac{d}{d_i} \right)^3 + C_{oe} \quad (82)$$

onde já se entrou também com a definição de \dot{N}_p .

No local da alimentação das partículas ao leito $d = d_i$, sendo por isso a concentração do oxigénio à saída do leito dada por

$$C_{os} = C_{oe} - \frac{\dot{m}_c}{U_f A_f M_c} \quad (83)$$

se a queima for completa, ou,

$$C_{os} = C_{oe} - \varphi \frac{\dot{m}_c}{U_f A_f M_c} \quad (84)$$

se a queima no leito ocorrer até à fração φ .

Agora pode introduzir-se a equação genérica de C , equação (81) para substituir C_∞ na equação (71) obtendo-se após alguma manipulação,

$$dt = - \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c Sh i D_g} \frac{\left(d + \frac{i Sh D_g}{k_c} \right)}{\left[(1 - \varphi) d_i^3 + \frac{U_f A_f M_c C_{oe} d_i^3}{\dot{m}_c} - d^3 \right]} d(d) . \quad (85)$$

Trabalhando um pouco mais esta equação chega-se a,

$$dt = - \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i Sh D_g} \frac{d + \alpha}{\beta - d^3} d(d) \quad (86)$$

onde,

$$\alpha = \frac{i \text{ Sh } D_g}{k_c} \quad (87)$$

e

$$\beta = (1 - \varphi) d_i^3 + \frac{U_f A_f M_c C_{oe} d_i^3}{\dot{m}_c} \quad (88)$$

sendo que a equação (86) será integrada entre os seguintes limites,

$$\begin{aligned} t = 0 & \quad d = d_i \\ t = t_\varphi & \quad d_\varphi = (1 - \varphi)^{1/3} d_i \\ \int_0^{t_\varphi} dt &= -\frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i \text{ Sh } D_g} \int_{d_i}^{(1-\varphi)^{1/3} d_i} \frac{d + \alpha}{\beta - d^3} d(d) \quad . \end{aligned} \quad (89)$$

A solução do integral genérico

$$\int \frac{x + a}{b - x^3} dx \quad (90)$$

pode ser obtida do seguinte endereço, <http://www.integral-calculator.com>, sendo o resultado apresentado na Figura 7.

$$\begin{aligned} f(a, b, x) &= \frac{x + a}{b - x^3} \\ \int f(a, b, x) dx &= \frac{(b^{1/3} + a) \cdot \ln(x^2 + b^{1/3} \cdot x + b^{2/3})}{6b^{1/3}} + \frac{(a - b^{1/3}) \cdot \arctan\left(\frac{2x + b^{1/3}}{\sqrt{3} \cdot b^{1/3}}\right)}{\sqrt{3} \cdot b^{1/3}} - \frac{(b^{1/3} + a) \cdot \ln(x - b^{1/3})}{3b^{1/3}} \end{aligned}$$

Figura 7 – Resultado da integração da equação (90).

Esta terá agora de ser trabalhada para se chegar a uma expressão para o tempo de queima de uma partícula, equação (91).

$$t_{\varphi} = \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i Sh D_g \beta^{2/3}} \left[\frac{\left(\beta^{1/3} + \alpha \right) \ln \left(d_i^2 + \beta^{1/3} d_i + \beta^{2/3} \right)}{6} + \frac{\left(\alpha - \beta^{1/3} \right) \arctan \left(\frac{2 d_i + \beta^{1/3}}{\sqrt{3} \beta^{1/3}} \right)}{\sqrt{3}} - \frac{\left(\beta^{1/3} + \alpha \right) \ln \left(d_i - \beta^{1/3} \right)}{3} - \frac{\left(\beta^{1/3} + \alpha \right) \ln \left[\left(1 - \varphi \right)^{2/3} d_i^2 + \beta^{1/3} \left(1 - \varphi \right)^{1/3} d_i + \beta^{2/3} \right]}{6} - \frac{\left(\alpha - \beta^{1/3} \right) \arctan \left[\frac{2 \left(1 - \varphi \right)^{1/3} d_i + \beta^{1/3}}{\sqrt{3} \beta^{1/3}} \right]}{\sqrt{3}} + \frac{\left(\beta^{1/3} + \alpha \right) \ln \left[\left(1 - \varphi \right)^{1/3} d_i - \beta^{1/3} \right]}{3} \right] \quad (91)$$

Uma aproximação simplista à resolução do integral da equação (89) seria o desenvolvimento prévio da função $\frac{d + \alpha}{\beta - d^3}$ em série como se passa a explicar. Como o diâmetro das partículas a queimar é pequeno, da ordem dos mm, o seu valor em metros é suficiente pequeno de modo que se pode desenvolver a função $\frac{x + a}{b - x^3}$, em série de Maclaurin,

$$f(x) = f(0) + x f'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \dots \quad (92)$$

e tomando só os dois primeiros termos da série,

$$\frac{x + a}{b - x^3} \approx \frac{a}{b} + \frac{x}{b} \quad (93)$$

Isto equivale a considerar que $b \gg x^3$.

Então, adotando esta aproximação

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{\varphi}} dt &= - \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i Sh D_g} \int_{d_i}^{(1-\varphi)^{1/3} d_i} \frac{d + \alpha}{d^3 + \beta} d(d) \\ &\approx - \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i Sh D_g} \int_{d_i}^{(1-\varphi)^{1/3} d_i} \left(\frac{\alpha}{\beta} + \frac{d}{\beta} \right) d(d) \end{aligned} \quad (94)$$

o resultado fica

$$t_{\varphi} = \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i Sh D_g} \left[\frac{\alpha}{\beta} d + \frac{d^2}{2 \beta} \right]_{(1-\varphi)^{1/3} d_i}^{d_i} \quad (95)$$

$$t_{\varphi} = \frac{\rho_c U_f A_f d_i^3}{2 \eta \dot{m}_c i Sh D_g} \frac{1}{\beta} \left\{ \alpha \left[1 - (1 - \varphi)^{1/3} d_i \right] + \left[1 - (1 - \varphi)^{2/3} \frac{d_i^2}{2} \right] \right\} \quad (96)$$

Substituindo agora na equação (96) α e β pelos seus valores, equações (87) e (88),

$$t_{\varphi} = \frac{\frac{\left[1 - (1 - \varphi)^{1/3} \right] d_i}{k_c} + \frac{\left[1 - (1 - \varphi)^{2/3} \right] d_i^2}{2 i Sh D_g}}{\frac{2 \eta}{\rho_c} \left[\frac{\dot{m}_c (1 - \varphi)}{U_f A_f} + M_c C_{oe} \right]} \quad (97)$$

Nesta expressão a primeira parcela do numerador refere-se ao peso da cinética enquanto a segunda parcela do numerador se refere ao peso da difusão. No denominador aparece a influência do peso da Mecânica de Fluidos do reator e que logicamente atuará tanto sobre a cinética como sobre a difusão.

3.3 Inventário de partículas no leito e dimensões deste.

As partículas nunca queimam completamente no leito, pois ao atingirem uma dimensão muito pequena ou são arrastadas pela corrente gasosa ou caem pelos orifícios da grelha de alimentação do ar de combustão. Por isso a análise que se segue será baseada no tempo de queima da fração φ , o t_{φ} .

Assumindo que a queima em leito fixo ocorre em regime permanente a taxa de alimentação de \dot{m}_c [kg/s] corresponde uma entrada de \dot{N}_p [partículas/s], que se relacionam entre si por,

$$\dot{m}_c = \dot{N}_p \rho_c \frac{\pi d_i^3}{6} \quad (98)$$

Considera-se que todas as partículas alimentadas ao leito têm o mesmo tamanho inicial e que queimam à mesma taxa. O tempo de residência de uma partícula no leito será o respetivo tempo de queima. Por isso, num dado instante o número de partículas que constituem o leito será dado por,

$$N_{pt} = t_{\varphi} \dot{N}_p \quad (99)$$

N_{pt} é o número total de partículas, de diversos tamanhos, ou o que é o mesmo, em diversos estágios de queima, que compõem o leito.

A massa total de combustível sólido existente no leito, m_{ct} , será função do número total de partículas existentes no leito N_{pt} e do respetivo diâmetro médio equivalente d_{eq} ,

$$m_{ct} = N_{pt} \rho_c \frac{\pi d_{eq}^3}{6} \quad (100)$$

O diâmetro médio equivalente das partículas que constituem o leito precisa de ser conhecido. Estas são alimentadas com um diâmetro inicial d_i e são queimadas até ao diâmetro final $(1 - \varphi)^{1/3} d_i$. Como o leito funciona em regime permanente a taxa de queima de uma partícula com o diâmetro médio equivalente, a multiplicar pelo número de partículas constituintes do leito, terá de coincidir com a taxa de alimentação de combustível ao leito, e por isso,

$$\dot{m}_c = \pi d_{eq}^2 K_{glo_{eq}} M_c C_\infty N_{pt} \quad (101)$$

onde a constante global da reação será função desse diâmetro médio equivalente

$$\frac{1}{K_{glo_{eq}}} = \frac{d_{eq}}{i Sh D_g} + \frac{1}{k_c} \quad (102)$$

e a concentração molar média do oxigénio no seio do leito será igualmente função do mesmo diâmetro médio equivalente das partículas.

$$C_\infty = \frac{\dot{m}_c}{U_f A_f M_c} \left[(1 - \varphi) - \frac{d_{eq}^3}{d_i^3} \right] + C_{oe} \quad (103)$$

Substituindo as equações (98), (99), (102) e (103) na equação (101), chega-se a

$$\frac{d_{eq}}{i Sh D_g} + \frac{1}{k_c} = \frac{6 t_\varphi M_c d_{eq}^2}{\rho_c d_i^3} \left\{ \frac{\dot{m}_c}{U_f A_f M_c} \left[(1 - \varphi) - \frac{d_{eq}^3}{d_i^3} \right] + C_{oe} \right\} \quad (104)$$

expressão da qual se pode tirar o valor de d_{eq} .

A altura do leito H para o qual se assume uma porosidade genérica ε será então,

$$A_f H = N_{pt} \pi \frac{d_{eq}^3}{6 \varepsilon} \quad (105)$$

ou seja,

$$H = \frac{N_{pt} \pi d_{eq}^3}{6 \varepsilon A_f} \quad (106)$$

3.4 Energia libertada na combustão.

Para efeitos do balanço energético à fornalha ou leito fixo, a energia libertada na queima completa do carbono será dada por,

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c PC_c \quad . \quad (107)$$

Mas as partículas lançadas na fornalha ou leito fixo são de madeira (biomassa), com o caudal de \dot{m}_b , e tendo-se uma ideia da redução de massa associada à pirólise das partículas de biomassa, se essa redução de massa for uma fração θ então ter-se-á,

$$\dot{m}_b = \theta \dot{m}_b + (1 - \theta) \dot{m}_b \quad (108)$$

sendo, o caudal mássico de carbono alimentada ao leito dado por

$$\dot{m}_c = (1 - \theta) \dot{m}_b \quad (109)$$

e o caudal mássico de voláteis, que se assumirá ser de C_3H_8 , dado por

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{C_3H_8} = \theta \dot{m}_b \quad . \quad (110)$$

Pode então dizer-se que,

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_{C_3H_8} PCI_{C_3H_8} \quad (111)$$

e finalmente, a potência térmica libertada pela queima do caudal \dot{m}_b de biomassa virá

$$\dot{Q}_b = \dot{m}_c \varphi PC_c + \dot{m}_{C_3H_8} PCI_{C_3H_8} \quad (112)$$

não esquecendo que a queima das partículas nunca é completa no seio do leito fixo.

3.5 Determinação do parâmetro η .

Este parâmetro que foi definido como um fator que permite contabilizar a competição inter-partículas pelo oxigénio disponível tem de facto um significado mais abrangente. Na queima de biomassa, quando esta é introduzida na fornalha ou grelha a alta temperatura sofre, como já se analisou anteriormente, uma pirólise com libertação de voláteis, que na presente modelação vão ser considerados como sendo propano. Ora estes voláteis vão consumir prioritariamente, no seu processo de combustão, o oxigénio disponível na corrente de ar de

alimentação da fornalha. Só o oxigénio remanescente é que ficará disponível para a combustão do resíduo sólido carbonoso.

Sabe-se que segundo a estequiometria da queima do propano em ar, $C_3H_8 + \frac{(3+8)}{4}(O_2+3,76 N_2)$, a respetiva razão ar combustível em massa é de,

$$(AC)_{est} = 15,66 \quad (113)$$

podendo então afirmar-se que,

$$\dot{m}_{ar-C_3H_8} = (AC)_{est} \theta \dot{m}_b \quad (114)$$

e por isso,

$$\dot{m}_{O_2-C_3H_8} = 0,23 (AC)_{est} \theta \dot{m}_b \quad (115)$$

Por outro lado, considerando que o caudal total de ar fornecido ao queimador é um múltiplo τ do caudal de biomassa,

$$\dot{m}_{ar-total} = \tau \dot{m}_b \quad (116)$$

conclui-se que

$$\dot{m}_{O_2-total} = 0,23 \tau \dot{m}_b \quad (117)$$

Mas das equações (115) e (117) pode escrever-se que,

$$\dot{n}_{O_2-C_3H_8} = \frac{0,23 (AC)_{est} \theta \dot{m}_b}{M_{O_2}} \quad (118)$$

e

$$\dot{n}_{O_2-total} = \frac{0,23 \tau \dot{m}_b}{M_{O_2}} \quad (119)$$

O caudal molar de oxigénio disponível para a queima do resíduo sólido carbonoso será,

$$\dot{n}_{O_2-residuo} = \frac{0,23 \tau \dot{m}_b}{M_{O_2}} - \frac{0,23 (AC)_{est} \theta \dot{m}_b}{M_{O_2}} \quad (120)$$

podendo agora definir-se o η

$$\eta = \frac{\tau - (AC)_{est} \theta}{\tau} \quad (121)$$

Para se ter uma ideia da ordem de grandeza dos valores do η , apresenta-se na Tabela 6 o valor sugerido pela equação (121) para algumas combinações dos parâmetros θ e τ .

Tabela 6 - Valores do η em função de θ e τ

τ	θ	
	0,6	0,7
9,5	0,011	-
9,7	0,031	-
10	0,060	-
10,2	0,079	-
10,5	0,105	-
11	0,146	0,0073
11,2	0,161	0,021
11,5	0,183	0,047
12	0,217	0,087

4 Resultados e discussão

4.1 Considerações de cálculo

Para os resultados que irão ser apresentados, foram admitidos alguns valores para vários parâmetros em causa, seguidamente descritos. Nas Figuras 13 e 14 são apresentadas as dimensões do queimador em causa. A área correspondente à entrada do ar (de forma a determinar a sua velocidade de entrada) considerada para efeito de cálculo foi a área da secção reta do queimador. Estimando o valor do caudal de peletes e estabelecendo os valores de θ e τ a usar, foi possível calcular a velocidade de entrada do ar na fornalha.

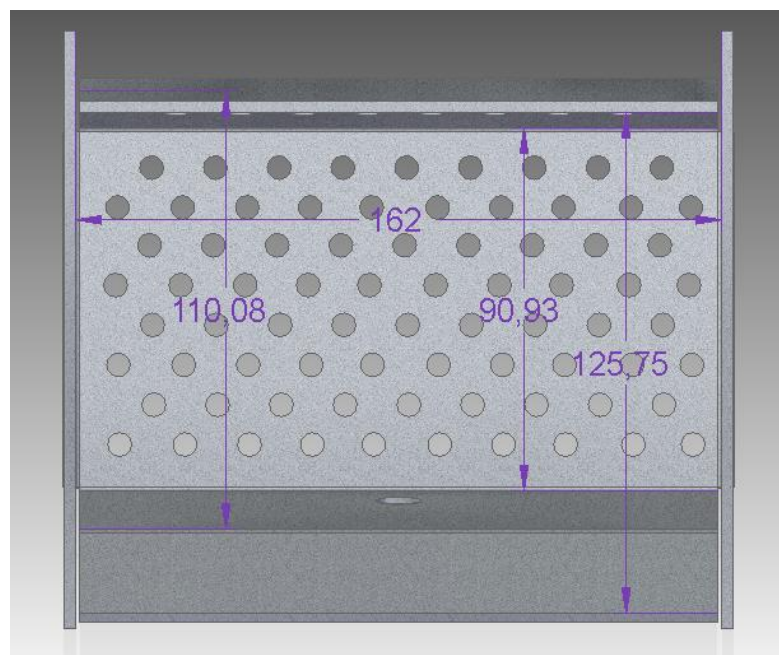


Figura 13 - Esquematização da fornalha

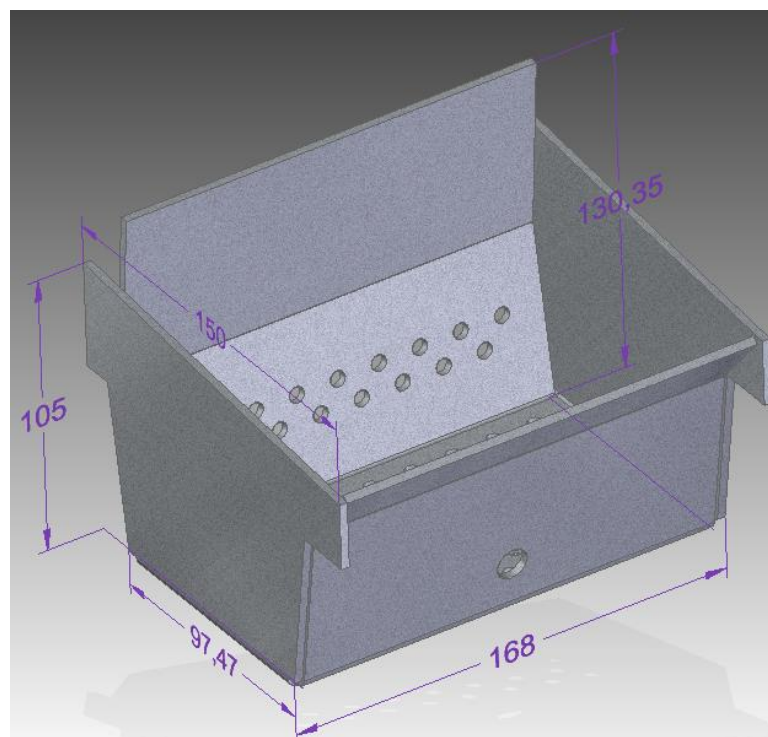


Figura 14 - Esquematização da fornalha

Na Tabela 7 estão resumidos os diversos valores assumidos para a simulação matemática do modelo de queima em estudo. Inicialmente estes valores foram tidos como fixos para as várias simulações realizadas.

Tabela 7- Valores base assumidos na simulação

Variável	Valor	Unidades
Diâmetro da pelete	6,26	mm
Comprimento da pelete	17,96	mm
Largura do queimador	90,93	mm
Comprimento do queimador	162	mm
PC do carbono	32794	kJ/kg
PCI do C_3H_8	46340	kJ/kg
Pressão atmosférica	101300	Pa
Fração queimada	0,9	-
Porosidade do leito	0,5	-
Massa volúmica da pelete	1092	kg/m ³
Massa molar do carbono	12	kg/kmol
Percentagem de voláteis	60	%

Os valores como o diâmetro, comprimento e massa volúmica das peletes foram obtidos através de valores recolhidos por medição e pesagem de peletes. Estes valores, foram fornecidos pelo Instituto Politécnico de Viseu e podem ser consultados no anexo A (Ferreira, 2014). Segundo Ribeiro e Pinho 2007, o propano (C_3H_8) representa bem a matéria volátil libertada de partículas de carvão. No presente modelo foi assumido para efeito de estudo que a composição da matéria volátil libertada durante a pirólise teria esta mesma composição. Esta suposição é de certa forma simplista, pois na realidade tal poderá não acontecer, e a composição poderá vir na forma de outro carboneto. Considerou-se que a percentagem de voláteis libertada seria cerca de 60%.

4.2 Casos possíveis

Para efeito de estudo, inicialmente foram delineadas algumas possíveis condições de funcionamento, próximas de possíveis casos reais e assim foram definidas algumas gamas de valores para determinados parâmetros do modelo, que influenciariam notoriamente os resultados finais. Os parâmetros escolhidos foram a temperatura da fornalha (temperatura de funcionamento), o caudal de peletes a entrar na fornalha e quantas vezes o caudal de ar entrante seria superior ao caudal de combustível (peletes).

Os valores escolhidos encontram-se descritos nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Valores de temperatura e τ assumidos

Temperatura (°C)	τ
750	9,5
800	9,8
850	10
900	11

Tabela 9 - Valores do caudal de peletes e correspondentes números de partículas por segundo

Caudal de peletes	Número de partículas por segundo
2 kg/h	1,9
3 kg/h	2,85

A combinação total destes valores descritos permitiu obter 32 simulações do modelo em estudo. Os principais resultados que levam à sua compreensão são apresentados de seguida.

Parâmetros secundários como a viscosidade dinâmica do ar, número de Reynolds, número de Schmidt, número de Sherwood, a difusidade do oxigénio e outros parâmetros

usados para efeitos de cálculo no modelo foram calculados pelas fórmulas apresentadas no anexo B. Os seus valores não serão aqui explicitados pois resumem-se a cálculos intermédios para se chegar aos resultados seguidamente expostos.

4.3 Resultados da simulação

Visto que foram obtidas duas expressões diferentes para calcular os valores do tempo de queima, uma inicial deduzida a partir do modelo em estudo (equação (91)) e outra por aproximação do mesmo (equação (97)), os resultados descritos serão diferenciados como valores obtidos através do modelo exato (equação deduzida) e do modelo aproximado (equação aproximada).

4.3.1 Tempo de queima

Relativamente ao tempo de queima, isto é, ao tempo que cada pelete demora a queimar na fornalha, apresentam-se os resultados em função do parâmetro τ para cada temperatura considerada tanto no modelo exato como para o modelo aproximado. Apresenta-se nas Tabelas 10 e 11 os resultados para um caudais de 2 kg/h e 3 kg/h respetivamente.

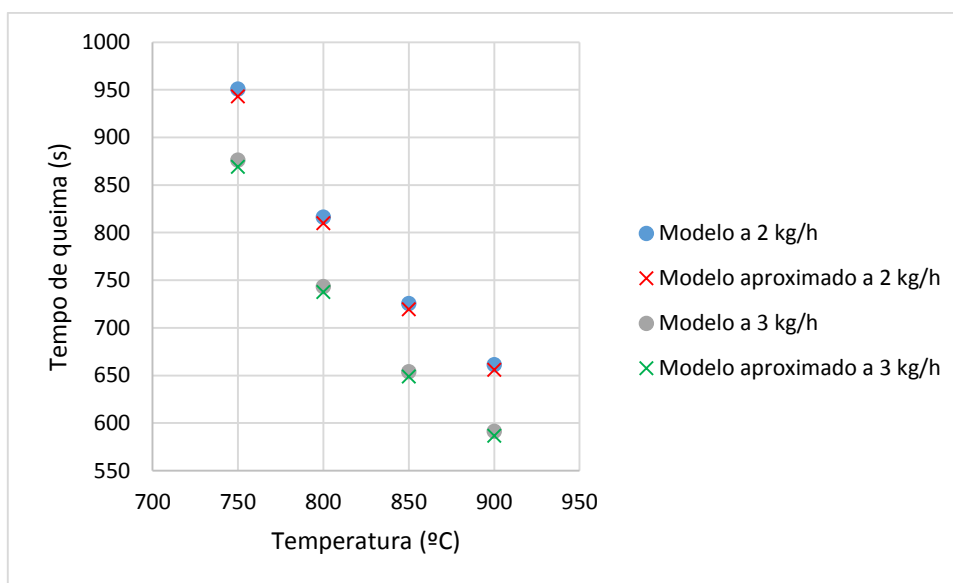
Tabela 10 - Tempos de queima para um caudal de peletes igual a 2 kg/h

		Modelo exato				Modelo aproximado			
		(s)				(s)			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	951	816	725	661	943	810	720	656
	9,8	251	215	191	174	249	214	190	173
	10	170	146	130	118	169	145	129	117
	11	69	59	52	48	69	59	52	47

Tabela 11 - Tempos de queima para um caudal de peletes igual a 3 kg/h

		Modelo exato (s)				Modelo aproximado (s)			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	876	743	654	591	869	737	649	587
	9,8	231	196	172	156	229	194	171	154
	10	157	133	117	106	156	132	116	105
	11	64	54	47	43	63	54	46,937	42

Considerando agora o efeito da temperatura, a variação do tempo de queima pode ser observada nas Figuras 15 a 18 para os casos em que τ corresponde a 9,5, 9,8, 10 e 11 respetivamente, para ambos os modelos e para os dois caudais estimados.

Figura 15 - Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 9,5$)

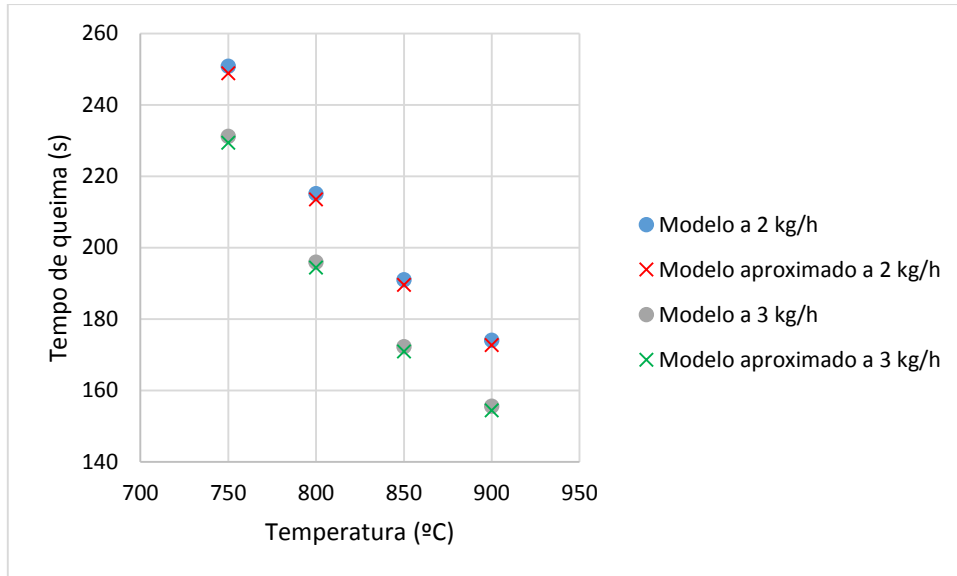


Figura 16 -Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 9,8$)

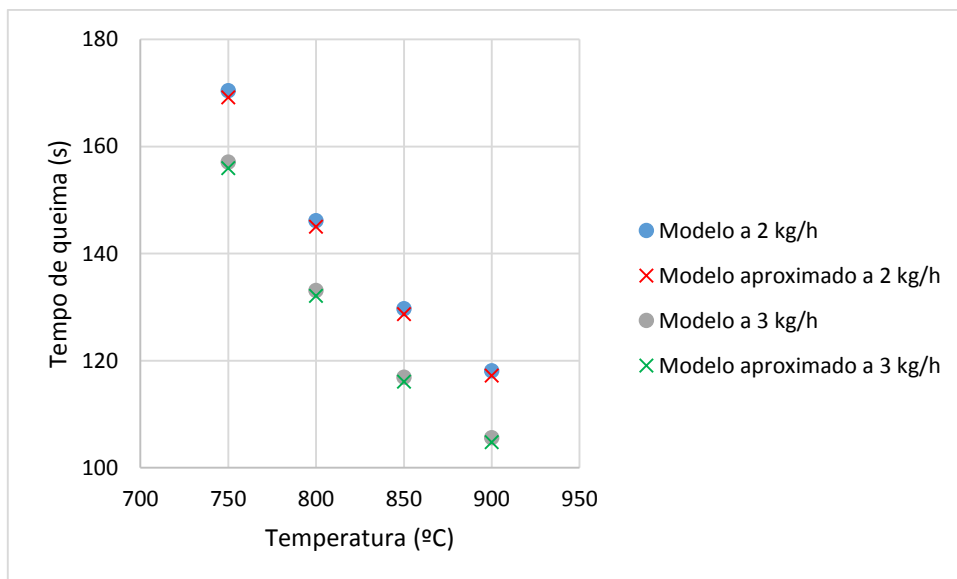


Figura 17 -Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 10$)

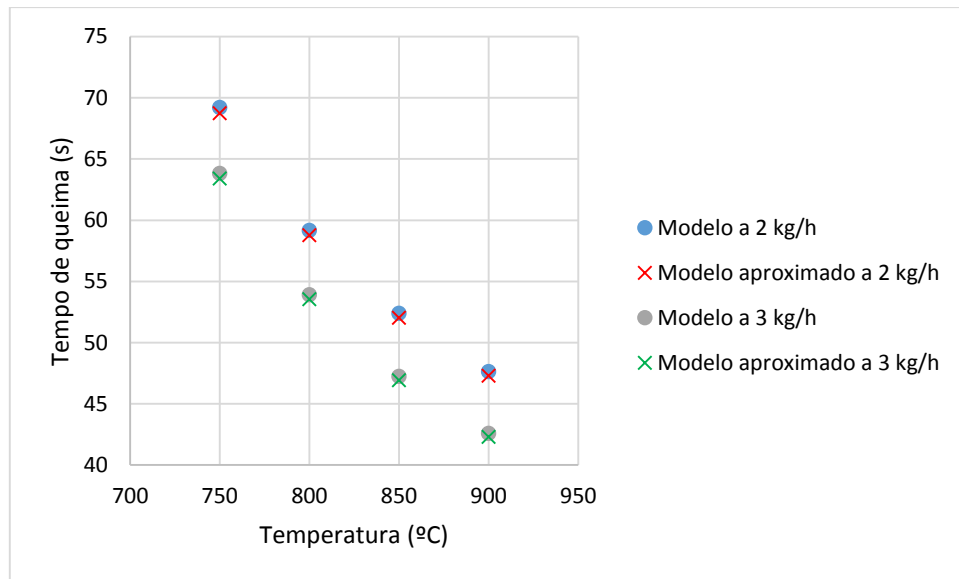


Figura 18 -Variação do tempo de queima em função da temperatura ($\tau = 11$)

Dos resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11, é possível verificar que entre o modelo exato e o modelo aproximado, os valores do tempo de queima para cada caso, variam muito ligeiramente, manifestando-se inferiores para o modelo aproximado. Verifica-se também que com o aumento do valor de τ , os valores do tempo de queima decrescem substancialmente para uma dada temperatura. Esta constatação poderá ser justificada visto que com o aumento do caudal de ar passa a existir uma maior concentração de oxigénio na fornalha, traduzindo uma combustão completa e mais rápida das peletes. Se for observada a variação de caudal entre as duas tabelas, observa-se que o aumento do caudal coincide também com uma diminuição do tempo de queima. Esta situação poderá dever-se pelo mesmo motivo explicado, visto que no modelo, foi assumida uma proporcionalidade direta entre o caudal de combustível (peletes) e o caudal de ar entrante. Das Figuras 15 a 18 constata-se que o aumento da temperatura de combustão relaciona-se com o substancial decréscimo do tempo de queima das peletes.

Analisando a equação (97) e separando as duas componentes descritas no Capítulo 3, isto é, se forem isoladas as componentes relativas ao tempo físico ou convectivo equivalente e o tempo cinético equivalente, permitirá saber que tipo de fenómenos é que estarão a influenciar maioritariamente a combustão das peletes. Estes dois tipos de tempos equivalentes traduzem respetivamente os efeitos difuso e cinético da combustão, influenciados pela fluidodinâmica do leito. Estes valores podem ser consultados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Tempos de queima equivalentes para 2 kg/h

		Tempo de queima cinético equivalente (s)				Tempo de queima convectivo equivalente (s)			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	434	310	229	174	509	500	491	482
	9,8	115	82	61	46	134	131	129	127
	10	79	56	41	31	91	89	87	86
	11	33	23	17	13	36	35	35	34

Tabela 13 – Tempos de queima equivalentes para 3 kg/h

		Tempo de queima cinético equivalente (s)				Tempo de queima convectivo equivalente (s)			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	434	310	229	174	435	427	420	413
	9,8	115	82	61	46	114	112	110	108
	10	79	56	41	31	77	76	75	73
	11	33	23	17	13	31	30	30	29

Como se pode observar nas Tabelas 12 e 13 as tendências anteriormente descritas repetem-se, contudo facilmente se repara que de um modo geral há um ligeiro maior peso do tempo físico relativamente ao tempo cinético. No entanto para o caudal de 3 kg/h, verificam-se em algumas situações maiores tempos cinéticos do que físicos, para $\tau = 10$ e $\tau = 11$ com temperatura de queima de 750 °C. São casos em que cinética tem maior peso, o que se compreende por serem situações de menor temperatura e com maior caudal de ar. Pode pois dizer-se que as duas parcelas são da mesma ordem de grandeza, concluindo-se que os dois fenómenos competem equilibradamente para o controlo da combustão.

4.3.2 Altura do leito

Outro parâmetro importante, para boa compreensão física do modelo em estudo, é a altura do leito de queima na fornalha, ou seja, a altura correspondente ao agregado de peletes que se encontram a queimar. Semelhantemente ao que se fez com o tempo de queima nas Tabelas 14 e 15 são apresentados os valores da altura do leito para o modelo exato e para o modelo aproximado, em função da temperatura de queima e de τ , considerando caudais de peletes de 2 kg/h e 3 kg/h, respetivamente.

Tabela 14 - Altura do leito para um caudal de peletes igual a 2 kg/h

		Modelo exato (mm)				Modelo aproximado (mm)			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	35	30	28	25	35	31	28	26
	9,8	9,199	8,033	7,25	6,702	9,352	8,175	7,386	6,834
	10	6,25	5,454	4,921	4,547	6,351	5,549	5,011	4,634
	11	2,534	2,205	1,985	1,831	2,571	2,239	2,018	1,862

Tabela 15 - Altura do leito para um caudal de peletes igual a 3 kg/h

		Modelo exato (mm)				Modelo aproximado (mm)			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	48	41	37	34	49	42	38	35
	9,8	13	11	9,718	8,912	13	11	9,894	9,082
	10	8,571	7,387	6,596	6,046	8,706	7,51	6,713	6,159
	11	3,478	2,988	2,661	2,434	3,527	3,033	2,703	2,475

Nas Figuras 19 a 22 coloca-se em perspetiva a variação da altura do leito em função da sua temperatura, tanto para o modelo exato como para o modelo aproximado, considerando os quatro valores de τ e os dois caudais de peletes estimados.

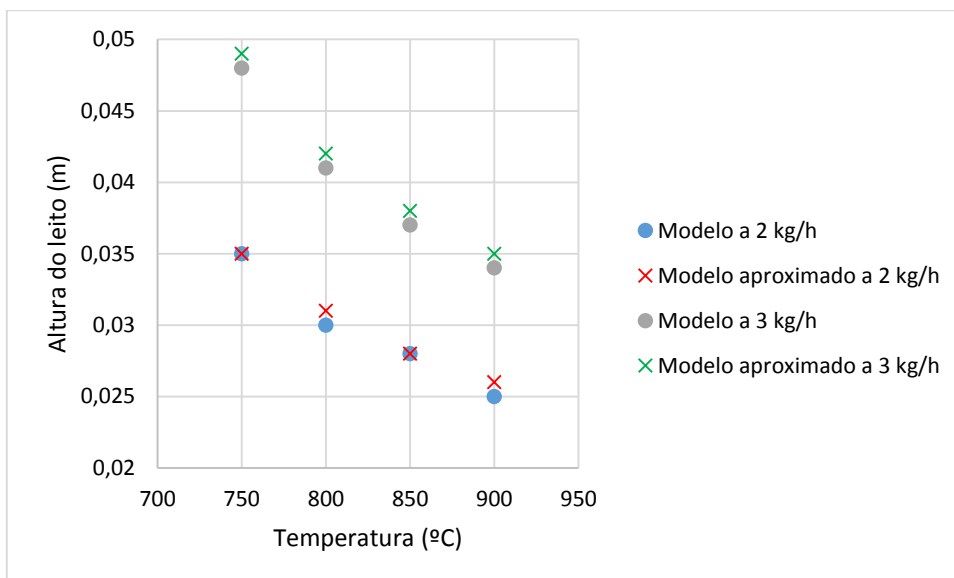


Figura 19 – Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 9,5$)

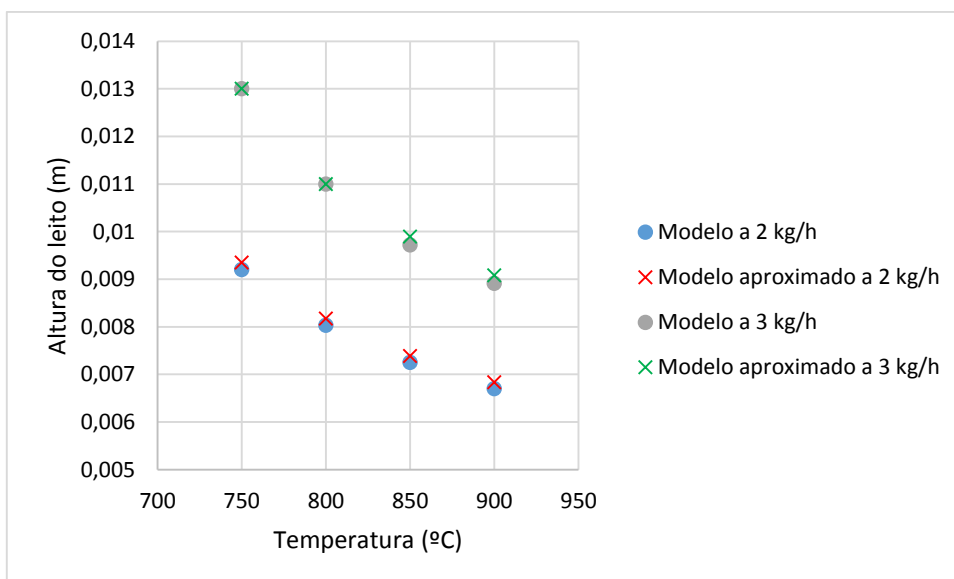


Figura 20 -Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 9,8$)

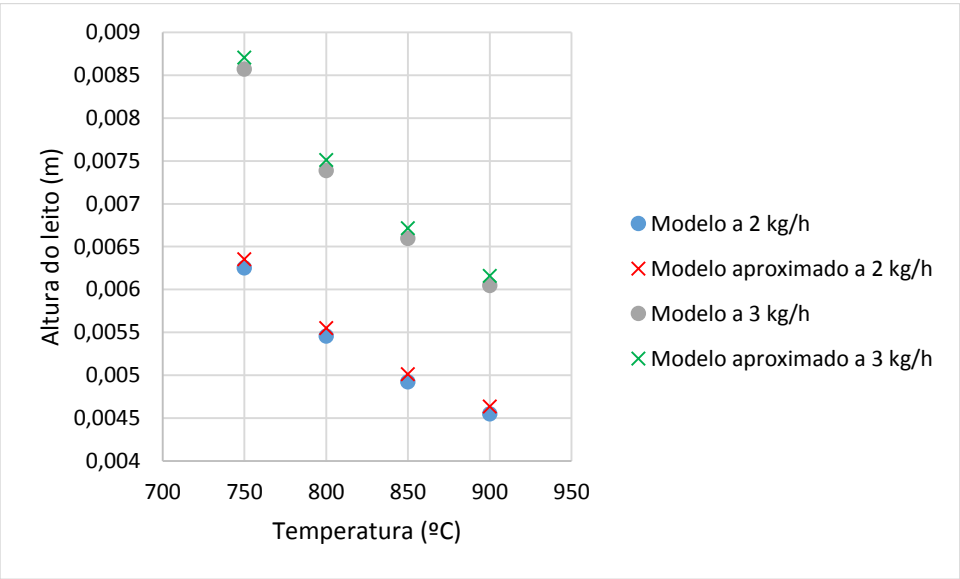


Figura 21 -Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 10$)

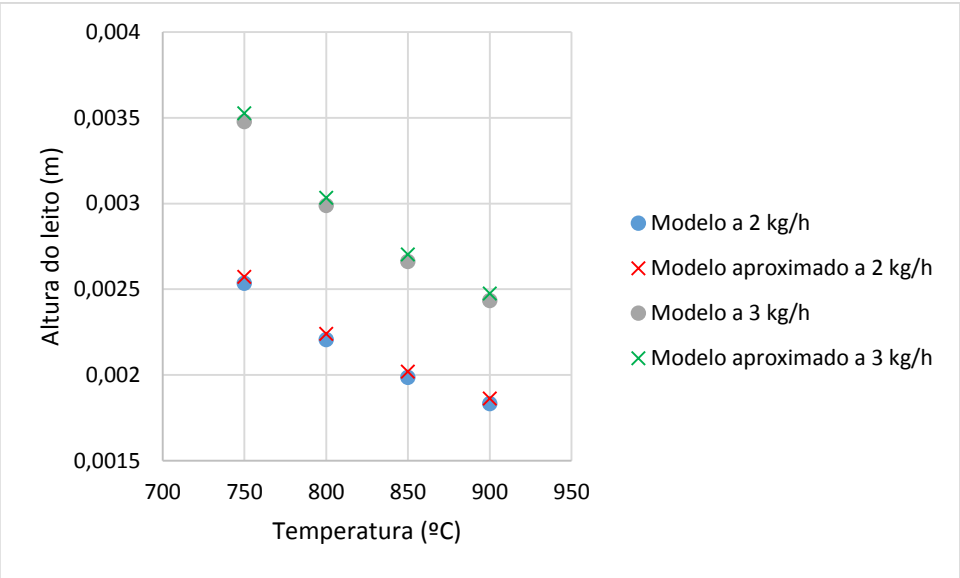


Figura 22 -Variação da altura do leito em função da temperatura ($\tau = 11$)

Observando as Tabelas 14 e 15 verifica-se que a altura do leito de queima de peletes não sofre grandes alterações entre o modelo exato e o modelo aproximado, manifestando-se, por vezes, apenas muito ligeiramente superior no modelo aproximado, por diferenças no máximo de 1 mm. Constata-se também que ao aumento do caudal de peletes corresponde a um aumento da altura do leito, o que aliás tem sentido prático. Fixando o valor de uma temperatura, para ambos os modelos, o valor da altura do leito decresce substancialmente com o aumento do valor de τ , o que poderá indicar, juntamente com os dados do tempo de queima, que o aumento da quantidade de oxigénio dentro da fornalha permite uma melhor combustão diminuindo o valor do mesmo. Por análise das Figuras 19 a 22 facilmente se percebe que com o aumento da temperatura de queima, a altura do leito decresce, esta observação está de acordo com a diminuição do tempo de queima pois a combustão processa-se mais rapidamente, devida à cinética da reação ser mais rápida.

A diminuição da altura do leito com a temperatura e com o caudal de ar de combustão compreende-se pois, como se mostrou antes, quer a cinética quer a transferência de massa têm influência no controlo da reação.

4.3.3 Número de partículas

Seguidamente são apresentados os resultados referentes ao número de partículas total, que constitui o leito em queima. Nas Tabelas 16 e 17 os valores obtidos são mostrados para cada temperatura considerada e em função do parâmetro τ , considerando o modelo exato e o modelo aproximado para os respetivos caudais.

Tabela 16 - Número de partículas para um caudal de peletes igual a 2 kg/h

		Modelo exato				Modelo aproximado			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	1806	1551	1378	1257	1792	1539	1367	1246
	9,8	477	409	363	331	473	406	360	329
	10	324	278	247	224	321	276	245	223
	11	132	113	100	91	131	112	99	90

Tabela 17 - Número de partículas para um caudal de peletes igual a 3 kg/h

		Modelo exato				Modelo aproximado			
		750 °C	800°C	850°C	900°C	750°C	800°C	850°C	900°C
τ	9,5	2497	2119	1864	1685	2477	2102	1849	1672
	9,8	659	559	491	444	654	554	487	440
	10	448	379	333	301	445	377	331	299
	11	182	154	135	121	181	153	134	121

A variação do número de partículas existentes no leito em função da temperatura de funcionamento pode ser observada nas Figuras 23 a 26 para as condições mencionadas.

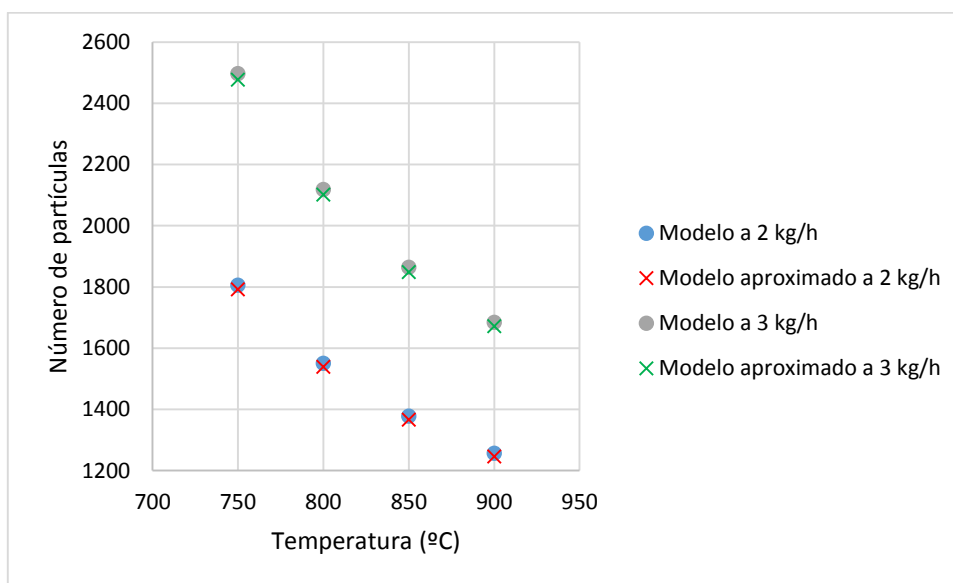


Figura 23 - Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 9,5$)

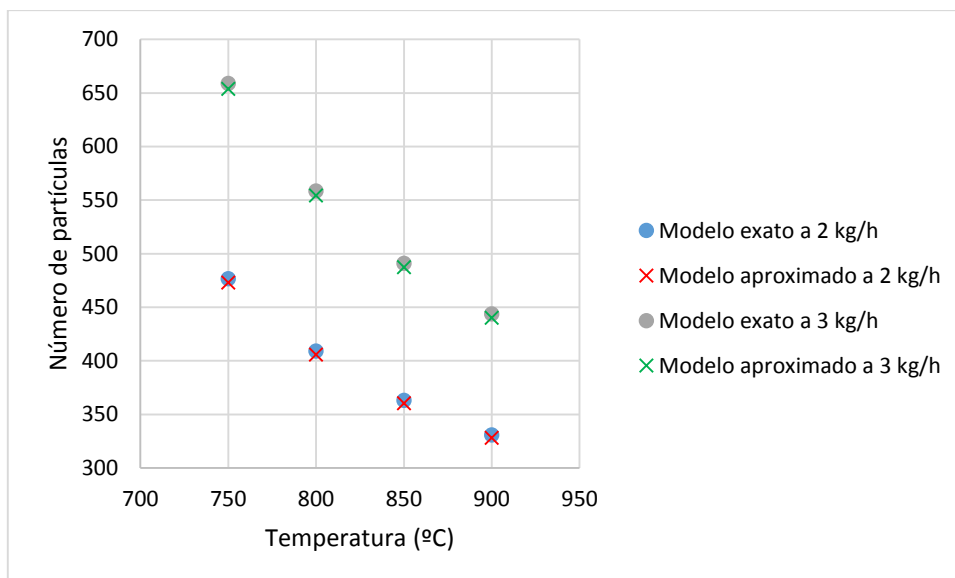


Figura 24 - Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 9,8$)

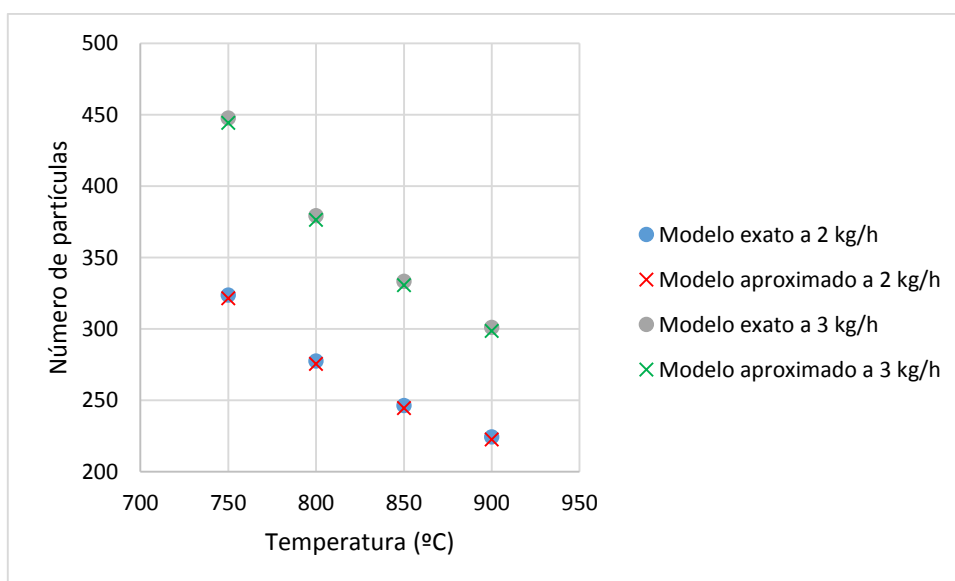


Figura 25 - Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 10$)

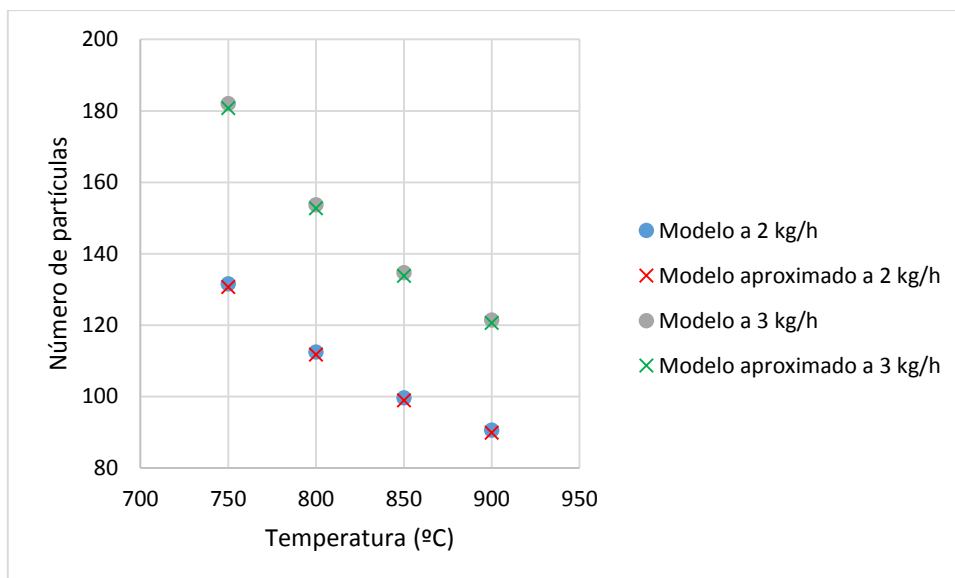


Figura 26 – Variação do número de partículas em função da temperatura ($\tau = 11$)

Dos valores obtidos verifica-se que o número de partículas do leito de queima aumenta com o uso de caudais de peletes superiores e decresce substancialmente com o aumento do valor de τ . Observa-se também que entre os dois modelos em causa, à formulação aproximada correspondem valores ligeiramente inferiores de número de partículas. O efeito da temperatura como mostram as Figuras 23 a 26 manifesta-se numa diminuição do número de partículas com o aumento da temperatura de queima de peletes, o qual está de acordo com a diminuição do tempo de queima verificada (combustão mais rápida).

4.3.4 Potência térmica libertada

Relativamente à potência térmica libertada calculada, esta apenas difere consoante o caudal de peletes usado. Os resultados obtidos encontram-se descritos na Tabela 18.

Tabela 18 - Potência térmica

Caudal (kg/h)	Potência térmica libertada (kW)
2	22,0
3	33,0

Da análise da tabela, verifica-se que a caudais superiores corresponde uma maior potência térmica obtida.

4.4 Discussão geral

Com a presente simulação, baseada num modelo relativamente simples da queima em regime permanente em leito fixo de partículas de biomassa, pretendeu-se avaliar se o modelo matemático em causa dava resultados coerentes com a perceção física que se tem da observação da queima de biomassa em caldeiras domésticas. Embora o desenvolvimento do modelo matemático tenha tido por suporte o estudo experimental da queima de peletes de biomassa (Ferreira, 2013), os resultados agora obtidos ainda não foram validados convenientemente por resultados experimentais. As limitações temporais inerentes a este tipo de trabalho tal o impediram, se bem que os testes experimentais já se tenham iniciado. Contudo, problemas práticos inerentes ao trabalho experimental cortaram a disponibilidade de comparação entre resultados da presente modelação e os resultados experimentais.

Os resultados obtidos das simulações feitas parecem estar coerentes com a tendência geral dos fenómenos verificados na combustão. O que poderá indicar que o modelo matemático é uma boa aproximação da realidade, tanto para a formulação exata como para o caso aproximado. O modelo traduz a influência da variação da quantidade de oxigénio existente na fornalha sobre o tempo de queima das peletes e sobre a altura do leito. Com o aumento de oxigénio verifica-se a diminuição quer do tempo de queima quer da altura do leito, ou seja, a combustão torna-se mais rápida. As variações verificadas com a altura do leito estão de acordo com os resultados relativos ao número de partículas que o constituem, variando estes parâmetros de igual forma. Assim, um aumento da temperatura leva à diminuição da altura do leito e do número de partículas (cinética mais rápida) e um aumento do caudal de peletes reflete o aumento dos mesmos.

Porém os resultados obtidos para valores de temperatura muito elevados são bastante discutíveis visto que a aproximação matemática feita é uma simplificação da realidade, e tempos de queima tão reduzidos não se deverão verificar na prática, assim como as correspondentes alturas de leito muito pequenas. De fato, o modelo não leva em conta alguns aspetos como:

- A não distribuição uniforme dos peletes na fornalha: durante a entrada de peletes no queimador, dificilmente se consegue uma distribuição espacial idealmente uniforme;
- O caudal de ar entrante não se distribui igualmente: facilmente se observa que em qualquer queima de leito fixo, a chama não se apresenta igual em toda a fornalha, geralmente esta é maior no centro. Tal se explica pela transferência de calor da fornalha para o ar, que facilmente influencia a sua circulação na câmara de combustão, alterando consequentemente o seu perfil de velocidade;
- Fenómenos relacionados com a transferência de calor com as paredes do queimador não são tidos em conta. No presente modelo considerou-se uma queima isotérmica não se levando em consideração flutuações de temperatura quer devidas às trocas térmicas com as paredes quer devido a alterações na taxa de combustão;
- O oxigénio contido na corrente de ar entrante é maioritariamente consumido pelas peletes na base do leito, dificultando a queima das peletes que se encontram no topo do leito. Embora tenha havido uma tentativa de considerar parte deste efeito por via do consumo de oxigénio pelos voláteis libertados na fase de pirólise das partículas, as

partículas de resíduo carbonoso mais perto da base do leito terão acesso primordial ao oxigénio restante e tal não foi levado em conta;

Estes fatores enunciados terão mais influência caso o modelo matemático seja aplicado para condições extremas da combustão, isto é, poderá haver discrepância nos resultados. Assim a proporcionalidade que se vai verificando entre o aumento de temperatura e a diminuição do tempo de queima e da altura do leito, poderá desviar-se dos resultados esperados.

5 Alterações ao caso de estudo

A observação dos resultados obtidos para os casos de estudo com as condições anteriormente descritas, apesar de evidenciarem algumas tendências, não permitem, no entanto, a perceção de alguns fenómenos visto que algumas das condições inicialmente tomadas mantiveram-se fixas, criando um universo restrito de soluções. Por este motivo, procedeu-se à alteração de alguns desses valores de modo a criar novas situações possíveis, considerando contudo apenas um dos 32 casos anteriormente analisados para comparação, visto que algumas tendências já foram identificadas.

O caso então escolhido para se proceder a esta alteração encontra-se descrito na Tabela 19.

Tabela 19 - Parâmetros do caso escolhido

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura	750	°C
τ	9,8	-
Caudal	2	kg/h
Percentagem de voláteis	60 %	-

A opção por este caso concreto reside no fato de que os valores de tempo de queima e altura do leito obtidos anteriormente traduzem de forma aproximada a observação feita para o efeito no Instituto Politécnico de Viseu. Numa fornalha em condições controladas foram queimadas peletes de pinho. A altura do leito observada era bastante fina, com altura máxima cerca de 1 cm, em que as peletes iam entrando na fornalha periodicamente.

5.1.1 Fração queimada

Um dos parâmetros, que poderá ter influência nos resultados do modelo matemático, é a fração queimada dos peletes. Por este motivo foram escolhidas três hipóteses possíveis: a utilização de uma fração queimada de 0,9 já anteriormente usada, um fração de 0,7 e outra de 1, que se refere a um caso ideal, que na prática não acontece, já que as partículas carbonosas, na parte final da queima, têm um diâmetro muito reduzido e/ou são arrastadas para fora do leito pela corrente de ar e gases de combustão ou caem para o cinzeiro da caldeira através dos orifícios existentes na base do queimador. Nas Figuras 27 a 29 estão representadas graficamente as variações do tempo de queima, altura do leito e o número de partículas do leito, consoante os três valores de fração queimada considerados.

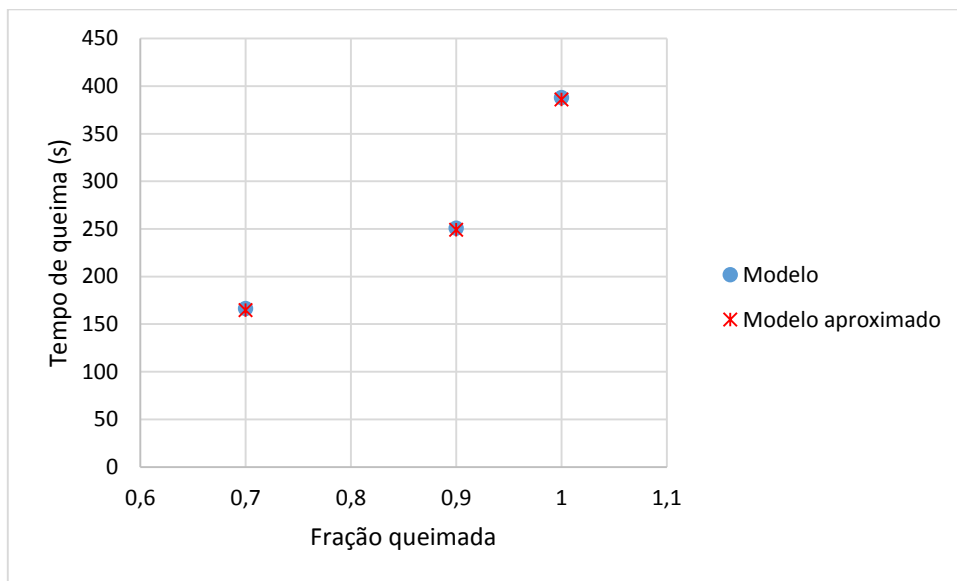


Figura 27 - Tempo de queima em função da fração queimada

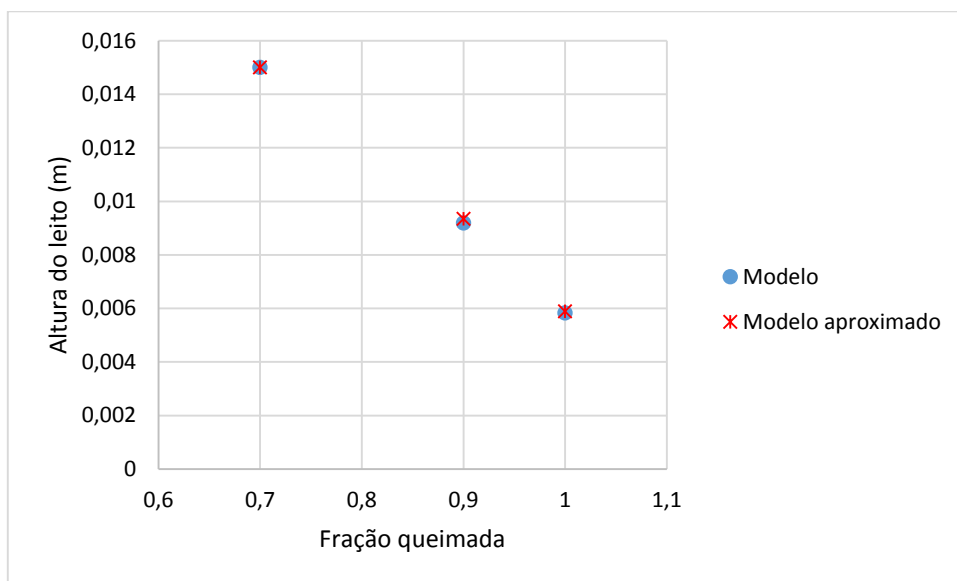


Figura 28 - Altura o leito em função da fração queimada

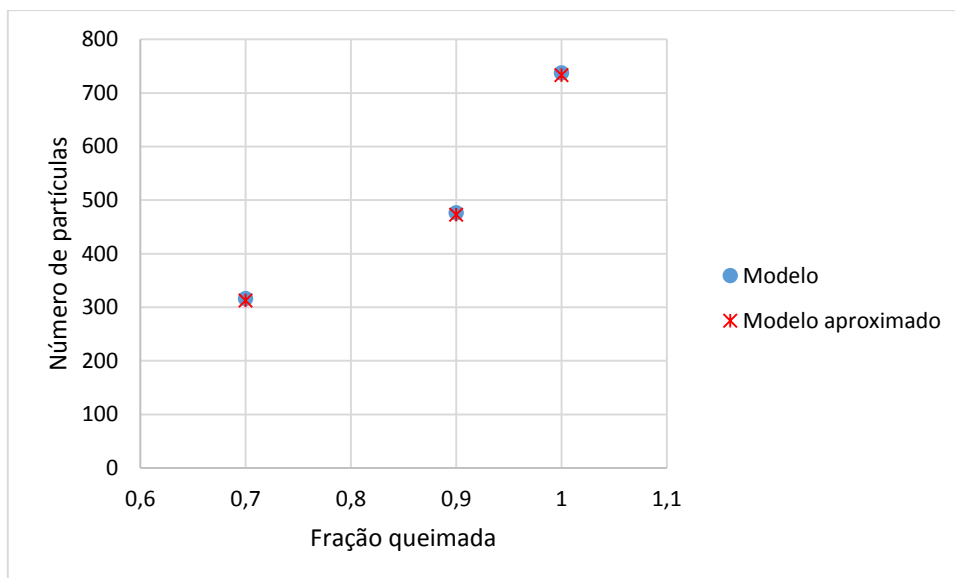


Figura 29 - Número de partículas em função da fração queimada

Da observação das Figuras 27 a 29 constata-se que com o aumento da fração queimada o tempo de queima aumenta, a altura do leito diminui e o número de partículas presentes no leito aumenta. A altura do leito diminui porque o diâmetro médio das partículas reduz-se substancialmente e mesmo que estas sejam mais, o espaço por elas ocupado reduz-se, apesar do seu tempo de queima aumentar. Analisando os diâmetros obtidos das partículas, facilmente se percebe este fato, estes resultados encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Diâmetros obtidos para as várias frações queimadas

	Modelo Exato	Modelo Aproximado
Fração queimada	Diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)
0,7	8,8	8,83
0,9	6,49	6,5
1	4,8	4,8

No entanto tal não se verificou para a potência térmica emitida. Na Tabela 21 encontram-se os valores obtidos para a potência térmica para as respetivas frações queimadas.

Tabela 21 - Potência térmica libertada para as frações queimadas

Fração queimada	Potência térmica libertada (kW)
0,7	20,51
0,9	22
1	22,7

Ao aumento da fração queimada, corresponde logicamente um aumento da potência térmica, visto que como uma maior percentagem da pelete é carbonizada, liberta-se mais energia na sua combustão.

5.1.2 Percentagem de voláteis

Obviamente que mediante a composição das peletes e as próprias condições de queima, a fração de voláteis correspondentes à fase da pirólise varia. Com os dados obtidos experimentalmente pelo Instituto Politécnico de Viseu sobre as peletes carbonizadas, verificou-se que a redução em matéria volátil correspondia a 77% (Anexo A). Contudo, este valor é discutível visto que as peletes medidas e pesadas antes da queima poderiam não ser as mesmas após carbonização. Foi por este motivo, considerada outra percentagem de matéria volátil, não tão elevada, para efeito de estudo (70%). Porém, como já foi observado no Capítulo 3, aumentando esta percentagem os valores do parâmetro η alteram de tal forma que τ também terá que ser alterado para que se obtenham valores corretos. Deste modo foram considerados dois casos possíveis para comparação do efeito da variação da percentagem de voláteis a partir do caso selecionado:

- Caso 1: comparação de duas simulações com percentagens de voláteis iguais a 77% e outro de 60% para um dado valor de τ ;
- Caso 2: comparação de duas simulações com percentagens de voláteis iguais a 70% e outro de 60% para outro valor de τ diferente;

Na Tabela 22 descrevem-se os valores de τ usados em cada situação.

Tabela 22 - Valores de τ usados para dois casos de estudo

Caso	τ
Caso 1 - 70% e 60%	11
Caso 2 - 77% e 60%	12,1

Analisando o primeiro caso, os resultados obtidos da comparação das percentagens de 70% e 60% para o modelo exato encontram-se descritos na Tabela 23, os resultados seguindo o modelo aproximado encontram-se na Tabela 24 e os valores das potências térmicas calculados apresentam-se na Tabela 25.

Tabela 23 - Resultados para o modelo exato considerando 70% e 60% de matéria volátil

Propriedade	Percentagem de voláteis		Unidades
	70%	60%	
τ	11	11	-
Tempo de queima	2188	69,2	s
Altura do leito	80	2,534	mm
Número de partículas	4158	132	-
Número de partículas por segundo	1,9	1,9	-

Tabela 24 - Resultados para o modelo aproximado considerando 70% e 60% de matéria volátil

Propriedade	Percentagem de voláteis		Unidades
	70%	60%	
τ	11	11	-
Tempo de queima	2177	68,7	s
Altura do leito	81	2,571	mm
Número de partículas	4137	131	-
Número de partículas por segundo	1,9	1,9	-

Tabela 25 - Potência térmica considerando 70% e 60% de matéria volátil

	Percentagem de voláteis		Unidade
	70%	60%	
Potência térmica	22,94	22,0	kW

Considerando agora o segundo caso, os resultados obtidos da comparação encontram-se resumidos na Tabela 26, para o modelo exato, e na Tabela 27 para a formulação aproximada. A potência obtida foi igual para ambas as formulações e pode ser consultada na Tabela 28.

Tabela 26 - Resultados para o modelo exato considerando 77% e 60% de matéria volátil

Propriedade	Porcentagem de voláteis		Unidades
	77%	60%	
τ	12,1	12,1	
Tempo de queima	1644	44,3	s
Altura do leito	60	1,62	mm
Número de partículas	3123	84	-
Número de partículas por segundo	1,9	1,9	-

Tabela 27 - Resultado para o modelo aproximado considerando 77% e 60% de matéria volátil

Propriedade	Porcentagem de voláteis		Unidades
	77%	60%	
τ	12,1	12,1	
Tempo de queima	1638	44	s
Altura do leito	61	1,64	mm
Número de partículas	3112	84	-
Número de partículas por segundo	1,9	1,9	-

Tabela 28 - Potência térmica considerando 77% e 60% de matéria volátil

	Porcentagem de voláteis		Unidade
	77%	60%	
Potência térmica	23,6	22,0	kW

As tabelas apresentadas, evidenciam que a percentagem de matéria volátil libertada na pirólise e considerada, no presente modelo, como sendo propano, influencia fortemente os resultados obtidos. Para percentagens superiores de libertação de voláteis, verificam-se valores consideravelmente superiores de tempo de queima, altura do leito e do número de partículas que o constituem. Isto deve-se porque estes voláteis vão capturar na sua combustão uma percentagem maior do oxigénio do ar de combustão, ficando por isso uma menor fração disponível para a queima do resíduo sólido carbonoso. Como a razão ar combustível para um hidrocarboneto é superior à razão ar combustível para um carvão, percentagens maiores de voláteis libertados na fase de pirólise, significa que a queima da biomassa irá requerer uma maior razão ar combustível do que no caso da percentagem de voláteis ser mais baixa, tal vai-se refletir num maior tempo de queima. Aumentando o tempo de queima devido a essa menor quantidade de ar, ou melhor, de oxigénio disponível, cresce o número de partículas em queima num dado instante e por isso cresce a correspondente altura de leito. Contudo, a diferença destes valores não difere muito do modelo exato para a modelo aproximado. No caso do valor da potência térmica, este não sofre grandes alterações e o número de partículas por segundo que entram na fornalha mantém-se constante a 1,9 para qualquer situação.

5.1.3 Redução de volume

Durante a pirólise há três possibilidades a considerar quanto ao tamanho das partículas. Estas podem “inchar”, manter o seu tamanho ou contraírem-se. Não há na literatura informações quando à ocorrência da primeira hipótese, que pode, no entanto, verificar-se na pirólise de carvões minerais. O mais comum é as partículas manterem, grosso modo, as suas dimensões ou sofrerem uma contração. Nos resultados simulados até ao momento admitiu-se que as partículas mantinham o seu tamanho após a pirólise. Na análise que se segue admitiu-se uma ligeira contração das partículas. Os dados obtidos pelo Instituto Politécnico de Viseu (anexo A) indicam esta contração, e através dos mesmos procedeu-se a uma correção numérica do valor da massa volúmica da pelete. Esta correção pode ser consultada no Anexo D. Os resultados obtidos após esta correção são indicados nas Tabelas 29 e 30 para o modelo exato e para a formulação aproximada, respetivamente, sendo comparados ao caso selecionado anteriormente. Em ambos os casos, a potência térmica libertada obtida é igual (22 kW).

Tabela 29 - Resultados do modelo exato com e sem redução de volume

Propriedade	Com redução de tamanho	Sem redução de tamanho	Unidades
Temperatura	750	750	°C
τ	9,8	9,8	-
Caudal	2	2	kg/h
Percentagem de voláteis	60 %	60 %	-
Massa Volúmica	672	436,8	kg/m ³
Tempo de queima	386	251	s
Altura do leito	9,199	9,199	mm
Número de partículas	477	477	-
Número de partículas por segundo	1,235	1,9	-

Tabela 30 - Resultado do modelo aproximado com e sem redução de volume

Propriedade	Com redução	Sem redução	Unidades
Temperatura	750	750	°C
τ	9,8	9,8	-
Caudal	2	2	kg/h
Percentagem de voláteis	60 %	60 %	-
Massa Volúmica	672	436,8	kg/m ³
Tempo de queima	383	249	s
Altura do leito	9,352	9,352	mm
Número de partículas	472,926	472,926	-
Número de partículas por segundo	1,235	1,9	-

Em ambos os casos (modelo exato e aproximado) se constata, por observação das tabelas mostradas, que a consideração da redução de volume das peletes se manifesta essencialmente no tempo de queima das mesmas. A redução volumétrica faz com que se obtenham tempos de queima superiores e o número de partículas entrantes por segundo diminua. Esta última constatação deve-se ao aumento do valor da massa volúmica das peletes que afeta o cálculo do número de partículas por segundo, apesar do caudal mássico de alimentação ser o mesmo para ambos os casos (2 kg/h).

6 Conclusões e sugestões

O presente trabalho tinha por objetivo o estudo e a modelização matemática simplificada de queima de biomassa (peletes) numa pequena fornalha em regime permanente. O modelo proposto para estudo teve por objetivo aproximar-se à realidade da combustão, para uma melhor perceção e conhecimento deste fenómeno.

Dos resultados apurados, o modelo matemático desenvolvido no presente trabalho revelou ser uma aproximação coerente da realidade da queima de peletes numa fornalha de leito fixo em regime permanente. Os resultados obtidos para os parâmetros em estudo mostram-se satisfatórios, na medida em que o estudo dos vários cenários possíveis de queima colocados à prova leva a que estes resultados evoluam de forma lógica com os fenómenos físicos esperados num cenário real, por uma simples perceção física que se obtém por observação visual da queima de biomassa.

Verificou-se que tanto a equação (91), referente ao tempo de queima da reação desenvolvida no presente modelo, assim como a sua simplificação adaptada, traduzida pela equação (97), revelam resultados sempre semelhantes e com as mesmas tendências para todos os cenários de queima simulados. Verificou-se também que o modelo consegue traduzir fenómenos como a diminuição do tempo de queima das peletes com o aumento do caudal de ar fornecido à combustão, o qual corresponde ao aumento da taxa de oxigénio e, portanto, leva a uma queima mais eficiente e rápida. Este resultado repete-se quando se consideram temperaturas sucessivamente superiores. Relativamente à altura do leito, esta varia de acordo com a variação do número de partículas existentes no mesmo. Um aumento do caudal de peletes reflete um aumento dos seus valores, se tanto o caudal de ar como a temperatura aumentarem, os resultados apontam para a sua diminuição (cinética da combustão mais rápida). A análise dos resultados indica também que se for considerada uma maior fração queimada das peletes, o tempo de queima aumenta (maior é o resíduo carbonoso) mas a altura do leito diminui, pois ocorre uma redução muito grande do tamanho das partículas. Para crescentes percentagens de voláteis libertados durante a pirólise, verificam-se aumentos do consumo de oxigénio utilizado na sua queima, levando a que o tempo de queima de peletes, a altura do leito e o seu número de partículas aumentem, pois o resíduo carbonoso terá acesso a menos oxigénio para poder queimar. Caso seja considerada a redução volumétrica das peletes na pirólise, tornando-as mais densas, verifica-se que o seu tempo de queima aumenta (maiores percentagens de carbono concentrado), e o número de partículas por segundo que entram na fornalha diminui pois, para a mesma massa de funcionamento, necessitam-se de menos partículas, uma vez que estas são mais densas comparativamente ao caso da não redução de volume.

Contudo, o modelo apresenta-se bastante simples na análise da queima e não tem em conta alguns aspetos importantes como, por exemplo, a não distribuição uniforme das peletes na fornalha, o escoamento irregular do caudal de ar entrante no queimador, a transferência de calor com as paredes do queimador, o consumo de oxigénio maioritariamente na base do leito e a exclusão, por hipótese, de outras substâncias gasosas libertadas durante a pirólise da biomassa (no presente caso considerou-se o propano por aproximação). Estes detalhes enumerados terão a sua influência nos resultados obtidos, como já foi dito anteriormente, principalmente quando o modelo é colocado a funcionar para condições mais extremas de queima. Nestas circunstâncias os resultados obtidos poderão ser díspares da realidade. Como

tal, sugere-se que o presente modelo seja futuramente adaptado para os cenários descritos de modo a que consiga traduzir, de uma forma mais fiel, a queima de biomassa para qualquer tipo de cenário.

Limitações temporais e experimentais não permitiram a comparação da informação modelada com dados experimentais, pelo que fica, também, como sugestão para um trabalho futuro, o estudo da coerência dos resultados obtidos pelas duas vias.

Numa sociedade que se depara com uma crise energética e ambiental, a biomassa surge como uma potencial fonte de energia capaz de solucionar alguns problemas. Apesar do seu limitado potencial energético, o uso da biomassa torna-se interessante para algumas aplicações da atividade do ser humano e a sua exploração deverá seguir uma orientação sustentável tanto no plano ambiental como económico. Sendo a combustão da biomassa o meio mais simples de exploração deste recurso, o presente modelo matemático vem assim tentar contribuir para que se conheça e perceba melhor os fenómenos que influenciam e dominam a combustão da mesma. Será através do conhecimento e da perceção destes fenómenos físicos e químicos que se poderá melhorar as condições de queima da biomassa que, tendo em conta a sua diferente composição, poderá melhorar a eficiência do processo de combustão tornando esta fonte energética mais competitiva e procurada.

7 Referências Bibliográficas

- Al-Kassir, A., Gañan, J., Marcos, A. e Olgun H., 2012. "Experimental study of gasification of biomass residues for electrical energy generation." *International Journal of Energy Research* no. 36 (2):241-248.
- Avedesian, M. M. e Davidson, J. F., (1973). Combustion of Carbon Particles in a Fluidised Bed. *Trans IChemE* 51, 121 – 131.
- Balat, M. e Ayar, G., 2005. "Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends." *Energy Sources* no. 27 (10):931-940.
- Brown, G., Hawkes A. D., Bauen, A. e Leach, M.A., 2006. "1. Biomass Applications."
- Coelho, S., Velázquez, S. M. S. G., Silva, O. C., Martins, O. S., Pecora, V. e Abreu, F. C. 2006. "Energy Generation by a Renewable Source–Sewage Biogas." *Evento del Cambio climático y Energía.(17-18, noviembre: Brasil). Memorias. Rio de Janeiro, Brasil.*
- Crooks, J. A., 2002. Characterizing ecosystem-level consequences of biological invasions: the role of ecosystem engineers. *Oikos* 97:153–66
- Demirbas, A., 2003. "Biomass and wastes: upgrading alternative fuels." *Energy Sources* no. 25 (4):317-329.
- Demirbas, A., 2007. "Combustion of biomass." *Energy sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects* no. 29 (6):549-561.
- Fargione, J. E., Plevin R. J. e Hill, J. D., 2010. "The ecological impact of biofuels." *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* no. 41:351-377.
- Ferreira, T. 2013 "Estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de peletes de Acacia e Cytisus (spp.) na eficiência térmica de uma caldeira doméstica de 20 kW", Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Instituto Politécnico de Viseu, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.
- Ferreira, T., 2014, comunicação pessoal.
- Ferreira, T., Paiva, J.M. e Pinho, C., 2014. "Performance assessment of invasive *Acacia dealbata* as a fuel for a domestic pellet boiler", AIDIC
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G. e Balogh, S. B., 2014. "EROI of different fuels and the implications for society." *Energy Policy* no. 64:141-152.
- IEA, 2013, "International energy outlook", Paris.
- IEA Bioenergy - Biomass Combustion and Co-firing: an Overview
- Kanury, A.M. (1975), "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon and Breach Science Publishers, New York

- Núñez-Regueira, L., Rodríguez-Añón, J. A., Proupín-Castiñeiras, J., e Nunez-Fernandez, O., 2001. "Calculation of forest biomass indices as a tool to fight forest fires." *Thermochimica acta* no. 378 (1):9-25.
- Nussbaumer, T., 2003. "Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction." *Energy & fuels* no. 17 (6):1510-1521.
- Obernberger, I., e Thek, G., 2010. "The pellet handbook." *Earthscan Ltd.*
- Pinho, C., 2011. "Sebenta de Combustão", Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Pinho, C. (2014), comunicação pessoal.
- Ramanathan V. e Carmichael G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat. Geosci.* 1:221–27
- Ranjan, A. e Moholkar, V. S., 2012. "Biobutanol: science, engineering, and economics." *International Journal of Energy Research* no. 36 (3):277-323.
- Ribeiro, L. e Pinho, C., 2007. "Combustion of slugs of propane and air moving up through an incipiently fluidized bed." *Combustion Theory and Modelling* no. 11 (3):401-425.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas A., Hossain, M. S. e Mekhilef, S. 2011. "A review on biomass as a fuel for boilers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no. 15 (5):2262-2289.
- Saracoglu, N., e Gunduz, G., 2009. "Wood Pellets—Tomorrow's Fuel for Europe." *Energy Sources, Part A* no. 31 (19):1708-1718.
- Schuck, S., 2006. "Biomass as an energy source." *International journal of environmental studies* no. 63 (6):823-835
- Trainer, T., 2014. "Some inconvenient theses." *Energy Policy* no. 64:168-174.
- Vamvuka, D., 2011. "Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes—An overview." *International Journal of Energy Research* no. 35 (10):835-862.
- Vargas-Moreno, J.M., A.J. Callejón-Ferre, J. Pérez-Alonso, e B. Velázquez-Martí, 2012. "A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no. 16 (5):3065-3083.
- Vasudevan, Palligarnai T., e Boyi Fu., 2010. "Environmentally sustainable biofuels: advances in biodiesel research." *Waste and Biomass Valorization* no. 1 (1):47-63.
- Wilcove D.S., Rothstein D., Dubow J., Phillips A., e Losos E., 1998. Quantifying threats to imperiled species in the United States. *BioScience* 48:607–15

Wiesenthal, T., e Aphrodite Mourelatou, 2006. *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?*

Yokoyama, S, e Y Matsumura, 2008. "The Asian biomass handbook: a guide for biomass production and utilization." *The Japan Institute of Energy*:61-62.

Anexo A

Os dados obtidos pelo Instituto Politécnico de Viseu relativamente às dimensões e massa das peletes em estudo são apresentadas nas seguintes tabelas.

Peletes de pinho não carbonizadas

Tabela A1 – Características das peletes de pinho não carbonizadas

	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa (kg)
1	18,13	6,22	0,645	0,000645
2	18,01	6,25	0,609	0,000609
3	17,75	6,41	0,64	0,00064
4	12,91	6,26	0,411	0,000411
5	10,32	6,39	0,31	0,00031
6	12,52	6,62	0,406	0,000406
7	17,77	6,27	0,582	0,000582
8	11,28	6,33	0,37	0,00037
9	21,48	6,46	0,722	0,000722
10	16,91	6,07	0,547	0,000547
11	26,86	6,09	0,945	0,000945
12	20,15	6,35	0,628	0,000628
13	16,33	6	0,612	0,000612
14	13,91	6,38	0,404	0,000404
15	23,56	6,23	0,827	0,000827
16	13,13	6,08	0,418	0,000418
17	20,7	6,18	0,709	0,000709
18	13,76	6,22	0,476	0,000476
19	36,42	6,1	1,363	0,001363
20	17,51	6,22	0,567	0,000567
Média	17,96	6,26	0,61	0,00061

Tabela A2 – Volume e massa volúmica de peletes de pinho não carbonizadas

Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)
550,89	0,000000551	1170,82
552,54	0,000000553	1102,18
572,80	0,000000573	1117,32
397,34	0,000000397	1034,37
330,96	0,000000331	936,68
430,93	0,000000431	942,14
548,67	0,000000549	1060,74
354,98	0,000000355	1042,31
704,03	0,000000704	1025,53
489,34	0,000000489	1117,83
782,40	0,000000782	1207,82
638,13	0,000000638	984,12
461,72	0,000000462	1325,48
444,69	0,000000445	908,50
718,19	0,000000718	1151,50
381,21	0,000000381	1096,51
620,92	0,000000621	1141,85
418,11	0,000000418	1138,46
1064,36	0,000001064	1280,58
532,06	0,000000532	1065,68
Média	0,000000550	1092,52

Peletes de pinho carbonizadas

Tabela A3- Características das peletes de pinho carbonizadas

	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa (kg)
1	19,41	4,54	0,19	0,00019
2	11,02	4,11	0,109	0,000109
3	14,48	4,15	0,131	0,000131
4	12,89	3,96	0,117	0,000117
5	10,71	4,25	0,111	0,000111
6	16,2	4,29	0,158	0,000158
7	20,36	4,13	0,174	0,000174
8	15,81	4,3	0,14	0,00014
9	20,1	4,19	0,207	0,000207
10	12,84	4,24	0,117	0,000117
11	12,77	4,16	0,123	0,000123
12	6,99	4,46	0,065	0,000065
13	16,62	4,44	0,144	0,000144
14	12,02	4,01	0,099	0,000099
15	16	4,23	0,147	0,000147
16	12,85	4,25	0,125	0,000125
17	14,72	4,12	0,112	0,000112
18	21,87	4,13	0,202	0,000202
19	17,39	4,07	0,162	0,000162
20	11,28	4,38	0,097	0,000097
Média	14,82	4,22	0,14	0,00014

Tabela A4 – Volume e massa volúmica de peletes de pinho carbonizadas

Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)
314,22	0,000000314	605
146,20	0,000000146	746
195,86	0,000000196	669
158,76	0,000000159	737
151,93	0,000000152	731
234,16	0,000000234	675
272,75	0,000000273	638
229,59	0,000000230	610
277,15	0,000000277	747
181,30	0,000000181	645
173,57	0,000000174	709
109,20	0,000000109	595
257,33	0,000000257	560
151,80	0,000000152	652
224,85	0,000000225	654
182,29	0,000000182	686
196,24	0,000000196	571
292,98	0,000000293	689
226,24	0,000000226	716
169,96	0,000000170	571
Média	0,000000207	660,17

Resumo

Na seguinte tabelas encontram-se resumidos os valores médios referidos nas tabelas anteriores.

Tabela A5 – Resumo de resultados

	Resultados			
	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)
Peletes de pinho	17,96	6,26	0,61	1092,5
Peletes de pinho carbonizadas	14,8	4,22	0,14	660,2

Cálculo da percentagem de matéria volátil

Tabela A6 – Resultados da análise percentual de massa e matéria volátil libertada

Redução de massa (g)	0,47
Massa final (%)	0,2295
Percentagem de voláteis (%)	0,7705

Anexo B

Considerações Matemáticas

Velocidade do ar:

$$Uf = \frac{Q_{ar}}{Af} \quad (122)$$

Em que Af é dado por:

$$Af = comprimento \times largura \quad (123)$$

Diâmetro equivalente:

$$d_{eq} = \phi \times d_{esf} \quad (124)$$

Diâmetro de uma esfera com o mesmo volume do pelete:

$$d_{esf} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \times d_p^2 \times l_p} \quad (125)$$

Esfericidade:

$$\phi = \frac{\text{Área da superfície da esfera com igual volume}}{\text{Área da superfície da partícula}} \quad (126)$$

$$\phi = \frac{d_{esf}^2}{\frac{d_p^2}{2} \times d_p \times l_p} \quad (127)$$

Constante da taxa de uma reação química k_c (carbono queima a CO):

$$k_c = 849,5 \times e^{-70 \times 106/RT} \quad (128)$$

O número de Sherwood, Sh , relativo à transferência da quantidade de movimento, é calculado em função do número de Reynolds (Re). Assim se o número de Reynolds se encontrar entre 10 a 1800, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Sh = 2 + 0,555 \times Re^{1/2} \times Sc^{1/3} \quad (129)$$

Caso Reynolds seja superior a 1800, então é usada a fórmula:

$$Sh = \frac{2+0,555 \times Re^{1/2} \times Sc^{1/3}}{1 + \frac{1,232}{Re \times Sc^{4/3}}} \quad (130)$$

Em que Sc designa o número de Schmidt, que traduz a transferência de massa por difusão e é calculado por:

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g \times D_g} \quad (131)$$

E Reynolds através da expressão:

$$Re = \frac{\rho_g \times V_i \times d_{eq}}{\mu_g} \quad (132)$$

Por sua vez, V_i é referente à velocidade do gás relativa à partícula de queima:

$$V_i = \frac{U_f}{\varepsilon} \quad (133)$$

Concentração do oxigénio:

$$C_{O_2} = 0,21 \times \frac{P_{atm}}{R_{ar} \times T_f} \quad (134)$$

Difusidade do oxigénio:

$$D_{O_2} = (0,18 \times 10^{-4}) \times \left(\frac{T_f}{298} \right)^{1,65} \quad (135)$$

Viscosidade dinâmica do ar:

$$\mu_{ar} = (1,716 \times 10^{-5}) \times \left(\frac{T_f}{273,15} \right)^{0,7} \quad (136)$$

Massa volúmica do ar:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R_{ar} \times T_f} \quad (137)$$

Anexo C**Tabelas de resultados da simulação**

Os dados assinalados com o número 1 são referentes à formulação exata, os dados assinalados com o número 2 são relativos à formulação aproximada.

Nomenclatura usada:

Npt – Número de partículas

Npt/s – Número de partículas por segundo

Tabela C1 – Resultados para a temperatura de 750°C

Tf	750	°C		
Caudal	τ	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h	9,5	Tempo de queima 1	951	s
		Altura de leito 1	35	mm
		Npt1	1806	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	943	s
		Altura de leito 2	35	mm
		Npt2	1792	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	7,535	s
	9,8	Tempo de queima 1	251	s
		Altura de leito 1	9,199	mm
		Npt1	476,587	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	249	s
		Altura de leito 2	9,352	mm
		Npt2	472,926	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	1,926	s
	10	Tempo de queima 1	170	s
		Altura de leito 1	6,25	mm
		Npt1	323,906	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	169	s
		Altura de leito 2	6,351	mm
		Npt2	321,469	-

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

3 kg/h	11	Npt2/s	1,9	-
		Delta t	1,283	s
		Tempo de queima 1	69	s
		Altura de leito 1	2,534	mm
		Npt1	131,524	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	69	s
		Altura de leito 2	2,571	mm
		Npt2	130,625	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	0,473	s
		Potência	22,005	kW
	9,5	Tempo de queima 1	876	s
		Altura de leito 1	48	mm
		Npt1	2497	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	869	s
		Altura de leito 2	49	mm
		Npt2	2477	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	6,913	s
		Tempo de queima 1	231	s
		Altura de leito 1	13	mm
		Npt1	658,916	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	229	s
		Altura de leito 2	13	mm
		Npt2	653,878	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	1,768	s
	10	Tempo de queima 1	157	s
		Altura de leito 1	8,571	mm
		Npt1	447,881	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	156	s
		Altura de leito 2	8,706	mm
		Npt2	444,525	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	1,177	s
		Tempo de queima	64	s

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

	11	1		
		Altura de leito 1	3,478	mm
		Npt1	181,98	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima		
		2	63	s
		Altura de leito 2	3,527	mm
		Npt2	180,742	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	0,434	s
		Potência	33,008	kW

Tabela C2 – Resultados para a temperatura de 800°C

Tf 800 °C				
Caudal	τ	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h	9,5	Tempo de queima		
		1	816	s
		Altura de leito 1	30	mm
		Npt1	1551	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima		
		2	810	s
		Altura de leito 2	31	mm
	9,8	Npt2	1539	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	6,527	s
		Tempo de queima		
		1	215	s
		Altura de leito 1	8,033	mm
		Npt1	408,888	-
		Npt1/s	1,9	-
	10	Tempo de queima		
		2	214	s
		Altura de leito 2	8,175	mm
		Npt2	405,72	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	1,667	s
		Tempo de queima		
		1	146	s
		Altura de leito 1	5,454	mm
		Npt1	277,736	-
		Npt1/s	1,9	-

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

		Tempo de queima 2	145	s
		Altura de leito 2	5,549	mm
		Npt2	275,627	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	1,11	s
	11	Tempo de queima 1	59	s
		Altura de leito 1	2,205	mm
		Npt1	112,466	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	59	s
		Altura de leito 2	2,239	mm
		Npt2	111,691	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	0,408	s
	Potência		22,005	kW
3 kg/h	9,5	Tempo de queima 1	743	s
		Altura de leito 1	41	mm
		Npt1	2119	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	737	s
		Altura de leito 2	42	mm
		Npt2	2102	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	5,919	s
	9,8	Tempo de queima 1	196	s
		Altura de leito 1	11	mm
		Npt1	558,601	-
		N1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	194	s
		Altura de leito 2	11	mm
		Npt2	554,291	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	1,512	s
	10	Tempo de queima 1	133	s
		Altura de leito 1	7,387	mm
		Npt1	379,46	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	132	s
		Altura de leito 2	7,51	mm

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

		Npt2	376,591	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	1,006	s
	11	Tempo de queima 1	54	s
		Altura de leito 1	2,988	mm
		Npt1	153,727	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	54	s
		Altura de leito 2	3,033	mm
		Npt2	152,672	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	0,37	s
		Potência	33,008	kW

Tabela C3 – Resultados para a temperatura de 850°C

Tf 850 °C				
Caudal	τ	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h	9,5	Tempo de queima 1	725	s
		Altura de leito 1	28	mm
		Npt1	1378	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	720	s
		Altura de leito 2	28	mm
		Npt2	1367	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	5,843	s
	9,8	Tempo de queima 1	191	s
		Altura de leito 1	7,25	mm
		Npt1	363,08	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	190	s
		Altura de leito 2	7,386	mm
		Npt2	360,246	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	1,491	s

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

	10	Tempo de queima 1	130	s
		Altura de leito 1	4,921	mm
		Npt1	246,502	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	129	s
		Altura de leito 2	5,011	mm
		Npt2	244,617	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	0,992	s
		11	Tempo de queima 1	52
	Altura de leito 1		1,985	mm
	Npt1		99,589	-
	Npt1/s		1,9	-
	Tempo de queima 2		52	s
	Altura de leito 2		2,018	mm
	Npt2		98,898	-
	Npt2/s		1,9	-
	Delta t	0,364	s	
Potência		22,005	kW	
3 kg/h	9,5	Tempo de queima 1	654	s
		Altura de leito 1	37	mm
		Npt1	1864	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	649	s
		Altura de leito 2	38	mm
		Npt2	1849	-
		Npt2/s	2,85	-
	Delta t	5,247	s	
	9,8	Tempo de queima 1	172	s
		Altura de leito 1	9,718	mm
		Npt1	491,044	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	171	s
		Altura de leito 2	9,894	mm
		Npt2	487,226	-
		Npt2/s	2,85	-
	Delta t	1,339	s	
	Tempo de queima 1	117	s	
	Altura de leito 1	6,596	mm	

	10	Npt1	333,392	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima		
		2	116	s
		Altura de leito 2	6,713	mm
		Npt2	330,852	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	0,891	s
	11	Tempo de queima		
		1	47	s
		Altura de leito 1	2,661	mm
		Npt1	134,723	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima		
		2	47	s
		Altura de leito 2	2,703	mm
		Npt2	133,791	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	0,327	s
	Potência		33,008	kW

Tabela C4 – Resultados para a temperatura de 900°C

Tf	900	°C		
Caudal	τ	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h	9,5	Tempo de queima		
		1	661	s
		Altura de leito 1	25	mm
		Npt1	1257	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima		
		2	656	s
		Altura de leito 2	26	mm
	9,8	Npt2	1246	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	5,358	s
		Tempo de queima		
		1	174	s
		Altura de leito 1	6,702	mm
		Npt1	330,771	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima	173	s

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

		2		
		Altura de leito 2	6,834	mm
		Npt2	328,174	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	1,367	s
		Tempo de queima 1	118	s
		Altura de leito 1	4,547	mm
		Npt1	224,48	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	117	s
		Altura de leito 2	4,634	mm
		Npt2	222,753	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	0,909	s
	11	Tempo de queima 1	48	s
		Altura de leito 1	1,831	mm
		Npt1	90,523	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	47	s
		Altura de leito 2	1,862	mm
		Npt2	89,89	-
		Npt2/s	1,9	-
		Delta t	0,333	s
		Potência	22,005	kW
3 kg/h	9,5	Tempo de queima 1	591	s
		Altura de leito 1	34	mm
		Npt1	1685	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	587	s
		Altura de leito 2	35	mm
		Npt2	1672	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	4,774	s
	9,8	Tempo de queima 1	156	s
		Altura de leito 1	8,912	mm
		Npt1	443,668	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	154	s
		Altura de leito 2	9,082	mm
		Npt2	440,196	-

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	1,218	s
	10	Tempo de queima 1	106	s
		Altura de leito 1	6,046	mm
		Npt1	301,094	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	105	s
		Altura de leito 2	6,159	mm
		Npt2	298,786	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	0,81	s
	11	Tempo de queima 1	43	s
		Altura de leito 1	2,434	mm
		Npt1	121,417	-
		Npt1/s	2,85	-
		Tempo de queima 2	42	s
		Altura de leito 2	2,475	mm
		Npt2	120,571	-
		Npt2/s	2,85	-
		Delta t	0,297	s
	Potência		33,008	kW

Anexo D**Tabelas de resultados das alterações de parâmetros****Fração queimada**

Os dados assinalados com o número 1 são referentes à formulação exata, os dados assinalados com o número 2 são relativos à formulação aproximada.

Nomenclatura usada:

Npt – Número de partículas

Npt/s – Número de partículas por segundo

Tabela D1 – Resultados para diferentes frações queimadas

Tf 750 °C				
Caudal	Fração queimada	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h e $\tau = 9,8$	0,7	Tempo de queima 1	166	s
		Altura de leito 1	15	mm
		Npt1	315,862	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	165	s
		Altura de leito 2	15	mm
		Npt2	312,715	-
		Npt2/s	1,9	-
	0,9	Potência	20,548	kW
		Delta t	1,656	s
		Tempo de queima 1	251	s
		Altura de leito 1	9,199	mm
		Npt1	476,587	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	249	s
		Altura de leito 2	9,352	mm
		Npt2	472,926	-
		Npt2/s	1,9	-
	1	Potência	22,005	kW
		Delta t	1,926	s
		Tempo de queima 1	388	s
		Altura de leito 1	5,83	mm
		Npt1	737,269	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	386	s
		Altura de leito 2	5,89	mm
		Npt2	733,474	-

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

	Npt2/s	1,9	-
	Potência	22,734	kW
	Delta t	1,997	s

Percentagem de voláteis

Os dados assinalados com o número 1 são referentes à formulação exata, os dados assinados com o número 2 são relativos à formulação aproximada.

Nomenclatura usada:

Npt – Número de partículas

Npt/s – Número de partículas por segundo

Tabela D2 – Resultados para percentagens de matéria volátil de 77% e 60%

Tf	750	°C		
Caudal	Percentagem volátil	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h e $\tau = 12,1$ $\varphi = 0,9$	0,77	Tempo de queima 1	1644	s
		Altura de leito 1	60	mm
		Npt1	3123	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	1638	s
		Altura de leito 2	61	mm
		Npt2	3112	-
		Npt2/s	1,9	-
	0,6	Potência	23,595	kW
		Delta t	5,864	s
		Tempo de queima 1	44	s
		Altura de leito 1	1,619	mm
		Npt1	84,145	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	44	s
		Altura de leito 2	1,64	mm
		Npt2	83,623	-
		Npt2/s	1,9	-
		Potência	22,005	kW
		Delta t	0,275	s

Tabela D3 – Resultados para percentagens de matéria volátil de 70% e 60%

Tf 750 °C				
Caudal	Percentagem volátil	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h e $\tau = 11$ $\varphi = 0,9$	0,7	Tempo de queima 1	2188	s
		Altura de leito 1	80	mm
		Npt1	4158	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	2177	s
		Altura de leito 2	81	mm
		Npt2	4137	-
		Npt2/s	1,9	-
	0,6	Potência	22,94	kW
		Delta t	11,214	s
		Tempo de queima 1	69	s
		Altura de leito 1	2,534	mm
		Npt1	131,524	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	69	s
		Altura de leito 2	2,571	mm
		Npt2	130,625	-
		Npt2/s	1,9	-
		Potência	22,005	kW
		Delta t	0,473	s

Variação volumétrica

Os dados assinalados com o número 1 são referentes à formulação exata, os dados assinalados com o número 2 são relativos à formulação aproximada.

Nomenclatura usada:

Npt – Número de partículas

Npt/s – Número de partículas por segundo

Tabela D4 – Resultados para variação volumétrica

Tf		750 °C		
Caudal	Redução de volume	Parâmetros	Valor	Unidades
2 kg/h e $\tau = 9,8$ $\varphi = 0,9$ $\theta = 0,6$	com	Tempo de queima 1	386	s
		Altura de leito 1	9,199	mm
		Npt1	476,587	-
		Npt1/s	1,235	-
		Tempo de queima 2	383	s
		Altura de leito 2	9,352	mm
		Npt2	472,926	-
		Npt2/s	1,235	-
	sem	Potência	22,005	kW
		Delta t	2,964	s
		Tempo de queima 1	251	s
		Altura de leito 1	9,199	mm
		Npt1	476,587	-
		Npt1/s	1,9	-
		Tempo de queima 2	249	s
		Altura de leito 2	9,352	mm
		Npt2	472,926	-
		Npt2/s	1,9	-
		Potência	22,005	kW
		Delta t	1,926	s

Anexo E

No presente anexo encontram-se os resultados para cada temperatura, dos tempos equivalentes físico (transferência de massa) e cinético obtidos por separação da fórmula 97 correspondente à formulação aproximada do tempo de queima.

Tabela E1 – Tempos equivalentes para 750 °C

750°C				
Caudal	τ	Tempos equivalentes	Valor	Unidade
2 kg/h	9,5	Tempo cinético	434	s
		Tempo físico	509	s
	9,8	Tempo cinético	115	s
		Tempo físico	134	s
	10	Tempo cinético	79	s
		Tempo físico	91	s
	11	Tempo cinético	33	s
		Tempo físico	36	s
3 kg/h	9,5	Tempo cinético	434	s
		Tempo físico	435	s
	9,8	Tempo cinético	115	s
		Tempo físico	114	s
	10	Tempo cinético	79	s
		Tempo físico	77	s
	11	Tempo cinético	33	s
		Tempo físico	31	s

Tabela E2 – Tempos equivalentes para 800 °C

800 °C				
Caudal	τ	Tempos equivalentes	Valor	Unidade
2 kg/h	9,5	Tempo cinético	310	s
		Tempo físico	450	s
	9,8	Tempo cinético	82	s
		Tempo físico	131	s
	10	Tempo cinético	56	s
		Tempo físico	89	s
	11	Tempo cinético	23	s
		Tempo físico	35	s
3 kg/h	9,5	Tempo cinético	310	s
		Tempo físico	427	s
	9,8	Tempo cinético	82	s
		Tempo físico	112	s
	10	Tempo cinético	56	s
		Tempo físico	76	s
	11	Tempo cinético	23	s
		Tempo físico	30	s

Tabela E3 – Tempos equivalentes para 850 °C

850 °C				
Caudal	τ	Tempos equivalentes	Valor	Unidade
2 kg/h	9,5	Tempo cinético	229	s
		Tempo físico	491	s
	9,8	Tempo cinético	61	s
		Tempo físico	129	s
	10	Tempo cinético	41	s
		Tempo físico	87	s
	11	Tempo cinético	17	s
		Tempo físico	35	s
3 kg/h	9,5	Tempo cinético	229	s
		Tempo físico	420	s
	9,8	Tempo cinético	61	s
		Tempo físico	110	s

Queima de peletes em regime permanente, análise teórica simplificada

	10	Tempo cinético	41	s
		Tempo físico	74	s
	11	Tempo cinético	17	s
		Tempo físico	30	s

Tabela E4 – Tempos equivalentes para 900 °C

900 °C				
Caudal	τ	Tempos equivalentes	Valor	Unidade
2 kg/h	9,5	Tempo cinético	174	s
		Tempo físico	482	s
	9,8	Tempo cinético	46	s
		Tempo físico	127	s
	10	Tempo cinético	31	s
		Tempo físico	86	s
	11	Tempo cinético	13	s
		Tempo físico	34	s
3 kg/h	9,5	Tempo cinético	174	s
		Tempo físico	413	s
	9,8	Tempo cinético	46	s
		Tempo físico	108	s
	10	Tempo cinético	31	s
		Tempo físico	73	s
	11	Tempo cinético	13	s
		Tempo físico	29	s